

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	放電加工・レーザ加工における加工制御に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	今井祥人
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第3707号, 授与年月日:1998年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第3707号, Conferred date:1998/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

放電加工・レーザ加工における
加工制御に関する研究

**Advanced Control Methods
for Performance Improvement in EDM/LBM**

平成 9 年 1 2 月

指導教官

中野 道雄 教授

提出者

大学院博士課程制御工学専攻

学籍番号 95D13019

氏名 今井 祥人

ABSTRACT

Advanced Control Methods for Performance Improvement in EDM/LBM

Yoshihito IMAI

(Supervised by Prof. M.NAKANO)

In this thesis, advanced control methods for performance improvement in Electrical Discharge Machining and Laser Beam Machining are described.

In EDM, the author has developed two new methods, one utilizing a disturbance observer to compensate for machining accuracy and the other utilizing a high frequency response actuator for stabilizing the machining states. When using a large electrode, the machining force deforms the machine and causes an error in the machined depth of between several tens and hundreds of micrometers. According to the value of the deformation estimated by the observer, the error can be compensated to within a few micrometers without additional machining, and the total machining time can be reduced by about 40%. In finish machining, a conventional electrode positioning system has difficulties in stabilizing the machining states because its frequency response is not high enough to control the states. With the developed high frequency response actuator, quite stable states are realized, and the machining speed is improved by roughly 1.5-2.5 times.

In LBM, adaptive feedforward control in addition to conventional CO₂ laser power feedback control is proposed. In a conventional system, the slow transient response of the laser power requires an extra dwell time, resulting in low productivity in the machining. With the proposed system, the response time is reduced to less than ten milliseconds without overshoot. As a result, the dwell time can be eliminated, and the machining speed improved by 30%.

These advanced control methods will have practical application in machine product.

論文要旨

本論文では、放電加工およびレーザー加工の高速・高精度化を実現するための加工制御について述べる。

放電加工では、安定な加工状態を維持するために極間電圧がある一定値となるように電極位置を調整する極間制御系が構成されている。特に大面積放電加工時においては、電極のジャンプ動作を併用し、極間から加工くずを強制的に排出することで安定な加工状態を実現する。しかしながら、このジャンプ動作に伴い発生する加工反力により加工機が変形し、数十～数百 μm の加工誤差が発生する。そこで、外乱オブザーバにより機械変形を推定し、その推定値により電極位置指令値を補正できる加工制御系を提案する。外乱オブザーバは、モード解析による機械系のモデルと加工反力をステップ状外乱と見なした外乱モデルより構成される。提案した加工制御系により、実加工における加工誤差を数 μm 以下に改善し、従来必要であった追加工を不要とすることで約 40% の加工時間短縮を実現した。

また、仕上げ加工や微細加工では、極間制御系を構成する従来の電極駆動装置の応答性がそれらの加工プロセスの動特性と比べて十分高くないため、安定な加工状態を維持することが困難である。そこで、圧電素子を用いた高速電極駆動装置を試作し、その駆動装置により極間制御系を構成し、その高速応答がどのように加工速度を改善するかについて検証した。その結果、高速電極駆動装置による極間制御系の場合、従来の場合に比べて約 1.5 ～ 2.5 倍の加工速度改善を実現した。また、電極駆動装置の高い応答性が加工速度改善に有効であることを、加工くずの挙動から定性的に説明できることを明らかにした。

レーザー加工では、これまでレーザー出力応答に遅れやオーバーシュートが発生し、加工条件切り替え時の加工テーブル移動において待ち時間の設定を必要とし、それが加工速度低下を招いていた。そこで、従来のフィードバック制御に適応型フィードフォワード制御を付加したレーザー出力制御系を提案する。フィードフォワード制御に必要なレーザー発振器の逆システムは、レーザー発振に寄与する有効電力とレーザー発振のしきい値電流を中間パラメータとすることで合理的に記述できる。このモデルは、フィードフォワード量を簡単に求められ、ガス劣化やガス温度変化に伴うレーザー出力特性の変動に対しても容易に適応修正が可能である。提案した制御系により、レーザー出力のステップ応答は、従来の数百 ms からオーバーシュートなく 10ms 以下に高速化される。また、薄板切断加工では、従来の待ち時間を設けなくても加工品質を維持でき、加工速度を約 30% 向上できる。

本論文で提案しているこれらの制御技術は、実際の加工機に搭載されつつあり、実用化の点でも十分なレベルに達している。

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 社会情勢の変化と加工方法の進歩	1
1.1.2 放電加工およびレーザ加工の概略	2
1.1.3 加工制御に関する従来の研究	4
1.2 本研究の目的と従来の研究との関連	7
1.3 本論文の構成	8
第2章 外乱オブザーバによる放電加工精度改善	11
2.1 はじめに	11
2.2 放電加工機における加工制御系	12
2.2.1 従来 of 加工制御系	12
2.2.2 大面積加工時の問題点	13
2.2.3 外乱オブザーバを用いた加工制御系	15
2.3 モード解析による機械系のモデル化	16
2.3.1 モード解析	16
2.3.2 モードモデルの決定	24
2.4 外乱オブザーバの構成	28
2.5 加工実験	31
2.5.1 電極位置の推定	31
2.5.2 加工深さ精度の改善	32
2.6 おわりに	34

第3章	高速電極駆動装置による放電加工速度改善	35
3.1	はじめに	35
3.2	高速電極駆動装置の試作	35
3.3	高速電極駆動装置による放電加工	38
3.3.1	ジャンプ加工	39
3.3.2	噴出加工	40
3.3.3	微細穴加工	42
3.4	加工くずの挙動と加工速度改善の因果関係	43
3.4.1	ジャンプ加工	43
3.3.2	噴出加工	44
3.3.3	微細穴加工	45
3.5	おわりに	45
第4章	適応型フィードフォワード制御による CO ₂ レーザ加工速度改善	47
4.1	はじめに	47
4.2	適応型フィードフォワード制御	48
4.3	レーザ発振器のモデリングと逆システムの構成	49
4.3.1	レーザ発振器の入出力特性	49
4.3.2	逆システムの構成	54
4.3.3	逆システムの適応修正則	58
4.4	シミュレーション	59
4.5	実験結果	62
4.5.1	実機におけるレーザ出力応答の改善	62
4.5.2	実加工における加工速度の改善	66
4.6	おわりに	68
第5章	結 論	69
5.1	本論文の結論	69
5.2	今後の課題	71

参考文献	73
発表論文リスト	79
謝 辞	87
付 録 A	89
付 録 B	93
付 録 C	95
付 録 D	97

第1章 緒論

1.1 研究の背景

1.1.1 社会情勢の変化と加工方法の進歩

現在の日本の繁栄を築きあげた要因の一つに、製造業の発展をあげることができる。繊維、鉄鋼から家電、自動車、半導体、情報通信へと、その時代をリードする産業は変化しているが、これまで、高度な生産技術を有する製造業が日本経済の発展を支えてきた。しかしながら、近年の中国、東南アジア諸国の急速な経済成長により世界経済は大競争時代へと突入した。また、1990年代初期のバブル崩壊により急激な円高や各種の規制による日本の高コスト構造により、世界的な競争力が低下しつつある。このような状況においては、高生産性を有した低コストな生産技術や中国、東南アジア諸国にはまねのできない独自の高度な生産技術を構築することが日本の製造業には不可欠である。

この生産技術を支える重要な要素として、物をつくるための加工方法があげられる[1],[2]。加工方法の進歩も、上記のような産業の発展にともなって変化してきた。最初のころは、刃物で物を削る切削加工や砥石を高速で回転して削る砥粒加工など、機械的なエネルギーを利用した機械加工が主流であった。切削加工や砥粒加工を行うための工作機械には、旋盤、ボール盤、フライス盤など、そしてNCプログラミングによる数値制御工作機械（NC工作機械）や自動工具交換装置（ATC）を有するマシニングセンタなどがある。この加工方法では、被加工物が刃物より軟らかいことが絶対条件である。ところが、航空・宇宙分野などの産業の発展において、軽量で高硬度な材料が利用されるようになり、それらを効率よく加工するための新しい加工方法が要求されるようになった。そこで、新たな加工方法として、被加工物に熱エネルギーを集中させ溶融、気化させる熱的除去加工が実用化された。これには、放電加工、レーザ加工、電子ビーム加工、プラズマ加工などが含まれる。そして近年、これらの加工方法に対しては、限界加工への挑戦や新産業分野への適用拡大などを通し、日本の製造業が競争力を維持できる生産技術の一つとなることがますます強く望まれている。

そこで、本研究では、「放電加工およびレーザ加工を対象とし、新しい加工制御技術により加工の高速・高精度化を実現する」ことで上記の要求へ対応することを目指す。

1.1.2 放電加工およびレーザ加工の概略

放電加工は、1940年代にソ連のラザレンコによるコンデンサの充放電を加工に利用したことが始まりである。放電加工の模式図を **Fig. 1.1** に示す [3]。図に示すように電極と被加工物を加工液中に対向して配置し、それらの間で放電を発生させることで、熱的に加工を行う。放電は、加工液中で発生させることでエネルギー密度が増し、熔融、気化された金属が排除されやすく、かつ電極や被加工物が冷却されるため、一般には絶縁性油や脱イオン水を加工液として放電加工を行う。

このような加工原理を利用して、現在では3つのタイプの放電加工機が市場に提供されている。

- ・ 形彫り放電加工機

銅やグラファイトを材料とした特定の形状を有する電極を用いて3次元転写加工を行う。

- ・ ワイヤ放電加工機

銅、黄銅、タングステンなどの導電性ワイヤ電極を用いて糸のこ式に2次元輪郭加工を行う。

- ・ 創成放電加工機

銅やグラファイトを材料とした単純な形状（円柱、角柱など）を有する電極を走査することで3次元創成加工を行う。

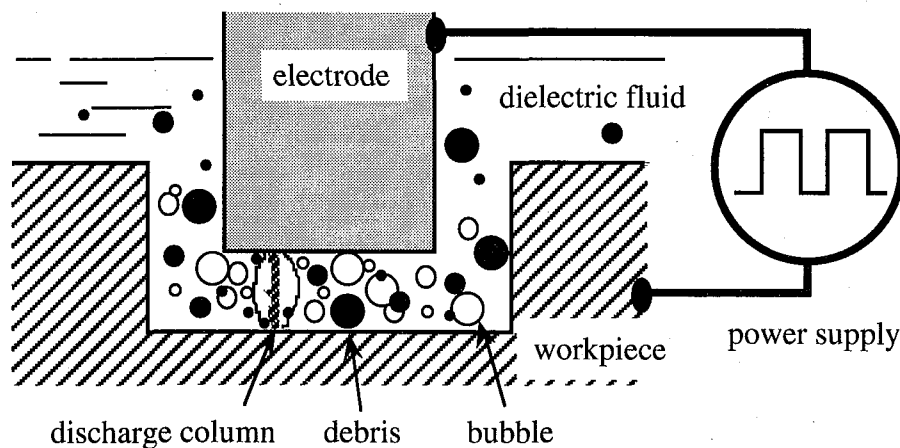


Fig. 1.1 Schematic illustration of electrical discharge machining.

一方、レーザ加工は、レーザ光を収束させ、その高エネルギー密度により被加工物を融解、気化させ除去加工を行うものである。**Fig. 1.2**には、 CO_2 レーザによる切断加工の模式図を示す。一般のレーザ切断加工では、加工部に集光したレーザビームと同時に酸素などのアシストガスを供給し、NC制御により加工テーブル、または加工ヘッド

を移動させることで所望形状を切断する。このアシストガスは、レーザービームが持つ熱エネルギーに加えて酸化反応を利用することで加工速度を高めることと、加工部からの溶融物の除去を行うためのものである。CO₂ レーザ以外にも加工に用いられるレーザーとしてYAG レーザ、エキシマレーザーなどがあり、それぞれ以下のような特徴を有する [4]。

- ・CO₂ レーザ

気体レーザーの1つであり炭酸ガスを主体とし、波長は10.6μmである。大出力化が容易であり、切断、溶接、表面改質に利用される。

- ・YAG レーザ

固体レーザーの1つでありYAGのロッドを用い、波長は1.06μmである。光ファイバによりレーザー光の伝送が可能であり、トリミング、マスキリペアリングなどの微細加工に向いている。

- ・エキシマレーザー

気体レーザーの1つでありArF, KrF, XeClの3種類、それぞれ波長は193nm, 248nm, 308nmである。高分子材料を対象にアブレーションによる微細なパターンニングに利用される。

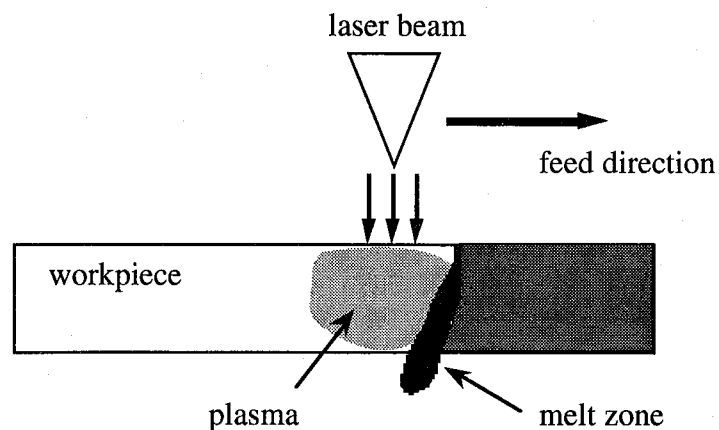


Fig. 1.2 Schematic illustration of laser beam machining.

1.1.3 加工制御に関する従来の研究

前節では放電加工およびレーザ加工の概要について述べたが、本節ではそれぞれの加工における加工制御に関する従来の研究をまとめる。放電加工では形彫り放電加工機、またレーザ加工ではCO₂レーザ加工機に限定し、加工の高速・高精度化を実現するための加工制御に関連する研究を対象とする。

Fig. 1.3(a) は、形彫り放電加工機における従来の典型的な加工制御系の構成を示したものである。まず、Fig. 1.3(a) にもとづいて形彫り放電加工機における加工制御の目的、特徴をまとめると以下のようなになる。

[形彫り放電加工機における加工制御]

[目的]

加工精度、加工面粗さを満足したうえで、最大の加工速度を実現する。

[制御対象]

- ・ 放電加工プロセスは、ランダム性や非線形性を有した複雑な系であり、その特性は変動する。
- ・ 放電加工プロセスの特性は、電極や被加工物の材料、電極と被加工物との距離（極間距離）、加工パルスの電気条件、加工液の流れなど様々な加工条件により決定される。

[制御手法]

- ・ 加工精度、加工面粗さをオンラインで直接測定することが不可能なため、それらと相関のある加工条件を実験的に求めて設定されている。
- ・ 極間電圧を検出し、その検出値が指令値に一致するように極間距離を制御するフィードバック制御系が構成されている。
- ・ 安定な加工状態を維持する手段として、電極のジャンプ動作／揺動動作、加工液の噴出を併用した加工が可能である。
- ・ 放電加工プロセスの特性変動に対して、加工状態を検出し適応的に加工条件の自動変更を行う広義の適応制御系が構成されている。（これ以降、本論文では広義の適応制御も単に適応制御と呼ぶこととする）
- ・ 安定な加工状態を維持するためには熟練作業による加工制御が不可欠な場合が存在する。

放電加工プロセスのモデル化に関しては、まず、熱伝導方程式にもとづく単発放電での物理モデルに関する研究が行われた [5], [6], [7]。しかしながら、これらのモデルは実際の加工状態をシミュレーションできるようなものではなかった。それは、実際の加工が連続放電であり、加工間隙に存在する加工くずや気泡の影響など放電加工プロセスが多くのパラメータにより支配されており、それらの関係を一つ一つ明らかにするのが困難なためである。

一方、放電加工現象の物理モデルではなく、加工制御を目的とした放電加工プロセ

スの動特性を求めた結果が報告されている．たとえば，放電加工プロセスのランダム性や非線形性を無視してローパスフィルタ特性で記述したもの [8]，ARMA モデルを導入したもの [9], [10]，確定系と確率系外乱モデルとで記述しようとしたものなどである [11]．

また，放電加工プロセスの特性はよくわからないものの，適応制御により安定な加工状態を実現しようとした研究が活発に行われている．どのような加工の状態量を検出し，その検出値からどのような評価基準で，どのような操作量を変更するかによって，それぞれ特徴のある適応制御系が提案されている．たとえば，加工パルスの無負荷時間を検出して加工速度が最大となるように加工中の電極送り速度，加工パルスの休止時間を変更するもの [12]，加工中の電磁波強度を検出して加工速度が最大となるように加工中の電極送り速度，加工パルスの休止時間，放電電流，加工液量を変更するもの [13]，加工パルスの効率を検出して加工速度が最大となるように加工中の電極送り速度，加工パルスの休止時間，加工サーボ系のゲイン，加工液量を変更するもの [14], [15], [16]，電極と被加工物間の抵抗値を検出して加工速度が最大となるように加工中の電極送り速度，加工パルスの休止時間を変更するもの [9], [10]，さらには加工パルス電圧に含まれる高周波成分，加工中の電極の動きなどからファジィ推論により総合的に加工状態を検出して加工速度が最大となるように加工パルスの休止時間，ジャンプ動作条件を変更するもの [17], [18], [19], [20] などである．

以上のように，多数の適応制御手法が提案され，ある程度の加工範囲においては熟練作業でなくとも最適な加工を実現できるようになっている [21], [22]．

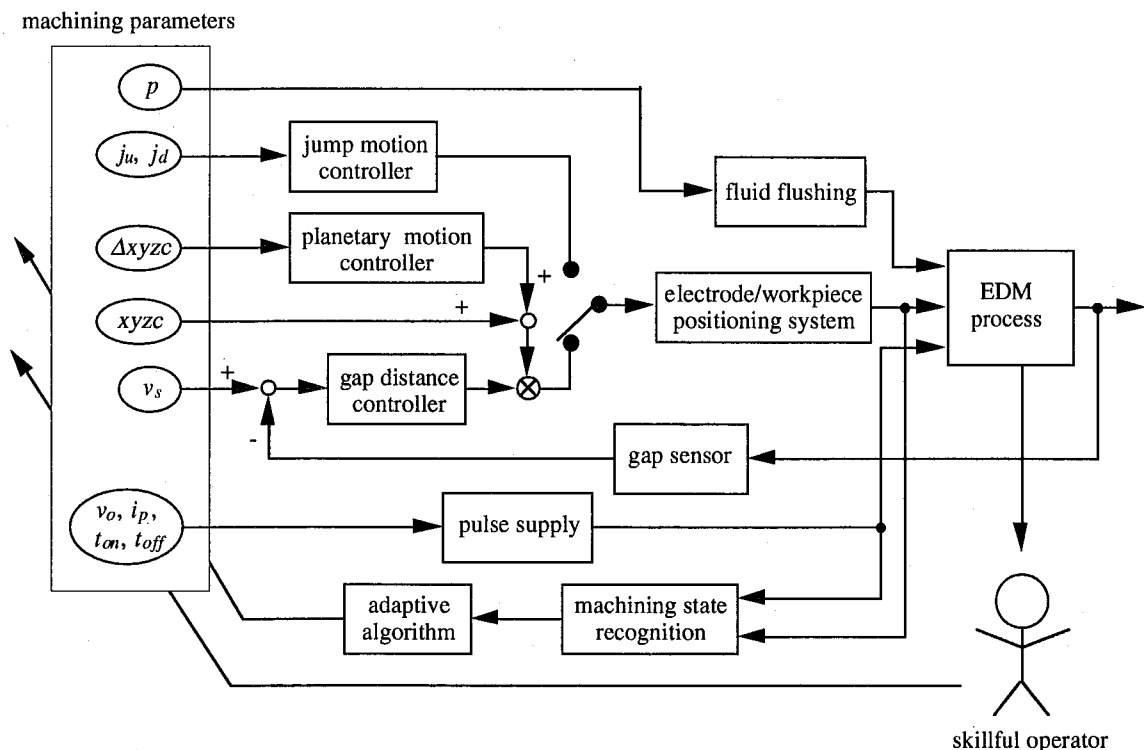


Fig. 1.3(a) Conventional control system for EDM process.

Fig. 1.3(b) は、CO₂ レーザ加工機における従来の典型的な加工制御系の構成を示したものである。まず、Fig. 1.3(b) にもとづいて CO₂ レーザ加工機における切断加工制御の目的、特徴をまとめると以下のようになる。

[CO₂ レーザ加工機における加工制御]

[目的]

加工精度、加工面性状を満足したうえで、最大の加工速度を実現する。

[制御対象]

- ・ レーザ加工プロセスは、高速な現象であり非線形性を有した複雑な系であり、その特性は変動する。
- ・ レーザ加工プロセスの特性は、被加工物の材料、レーザパルス条件、レーザビーム走査速度、アシストガスなど様々な加工条件により決定される。

[制御手法]

- ・ 加工精度は、レーザビームの走査または被加工物の移動を行う駆動系 (XY テーブル) の位置決め精度でほぼ決まる。
- ・ 加工面性状をオンラインで直接測定することが不可能なため、それらと相関のある加工条件を実験的に求めて設定される。
- ・ レーザパワーセンサによるレーザ出力のフィードバック制御系が構成されている。
- ・ 加工プロセスの適応制御系は、加工状態を検出する有効なセンサがないためあまり実用化されていない。

レーザ加工プロセスのモデル化に関しては、放電加工と同様に熱伝導方程式にもとづく物理モデルが求められている [23]。また、加工プロセスの適応制御系としては、加工中に発生する火花をカメラでとらえ、ルールベースよりレーザパワー、アシストガス流量、テーブル移動速度を変更するもの [24]、加工中に発生する AE 信号を検出し、テーブル移動速度を変更するもの [25] などが提案されているが、実験室レベルのものが多く、また、あらかじめ加工形状やテーブル移動速度と最適なレーザパワーの関係をテーブルで持っておき、レーザパワーを調整しながら加工する適応制御系 (スケジューリング制御) が提案されている [26]。なお、レーザ加工機における適応制御に関する研究は放電加工機ほど多くない。

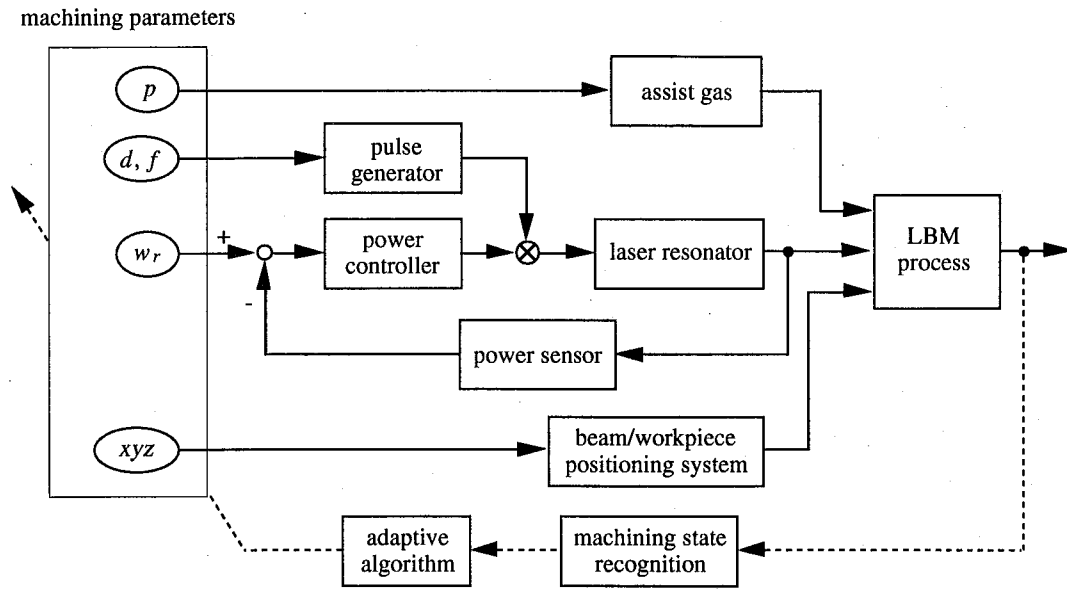


Fig. 1.3(b) Conventional control system for LBM process.

1.2 本研究の目的と従来の研究との関連

前節では、形彫り放電加工機およびCO₂レーザ加工機の加工制御系に関する従来の研究についてまとめたが、それぞれの加工制御においては以下のような問題点が存在する。

放電加工機においては、これまでの適応制御系により、熟練作業でなくとも標準的な加工範囲において最適な加工を実現できるが、多様な加工範囲のすべてにおいて有効な適応制御系は実現されていない。特に大面積の放電加工においては、指令した加工深さよりも実際の加工深さが浅く仕上がるという問題があり、熟練作業でさえも加工精度の保証が難しく、所望の加工精度を実現するためには加工深さ計測と追加工を繰り返す必要がある。この追加工は大幅な加工時間の増加を招いている。

また、これまでの加工制御の中心は、たとえば加工パルス条件やジャンプ動作条件など、複数の操作量の最適値設定手法（適応修正手法）に関するものであり、それぞれの操作量を実現するための装置に要求される性能についての検討が十分なされていない。たとえば、どのような応答特性を持つ電極駆動装置ならば加工速度改善がさらに期待できるのか、どのくらい細かく加工パルス幅の設定ができる加工電源ならば安定な加工状態を維持しやすくなるのかという検討である。

レーザ加工機においては、加工プロセスの状態を検出できる実用的なセンサがないことから、放電加工機とは異なり加工フィードバックループが存在しないのが一般的である。したがって、レーザ加工においてはレーザ発振器のレーザパワーの制御性能

の問題が顕在化することになる。特に、設定されている加工条件やガス劣化状態の相異によりレーザ発振器のレーザ出力応答にオーバーシュートや時間遅れを伴うことがあり、加工速度の改善を図る上で大きな障害となっている。

本研究の目的は、以上のことから放電加工およびレーザ加工における次の3つの課題を解決することにある。

[課題1]

大面積放電加工における加工機変形による加工精度悪化の改善

[課題2]

放電加工における電極駆動系の応答性と加工速度の関係を明確化し、仕上げ加工領域での加工速度の改善

[課題3]

レーザ加工におけるオーバーシュートや時間遅れを伴うレーザ出力応答による加工速度低下の改善

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第2章では、[課題1]に関して外乱オブザーバによる放電加工精度の向上について述べる。これは、大面積放電加工時に発生する加工反力により機械変形を生じ、加工精度が低下するという問題に対して、外乱オブザーバにより機械変形を推定し、その変形量を補償することで加工精度の改善を図るものである。ここでは、モード解析により機械系のモデル化を行い、加工反力をステップ状外乱と見なして外乱オブザーバを構成している。設計した外乱オブザーバのシミュレーションによる評価、および実加工での機械変形量の推定結果を示す。また、実際の多段加工において、従来の加工制御での加工精度、加工速度との比較を行い、ここで提案する加工制御の有効性を明らかにする。

第3章では、[課題2]に関して高速電極駆動装置による放電加工速度の改善について述べる。従来、安定な放電加工状態を維持するために、極間電圧が一定値となるように加工電極位置を調整する加工制御系が構成されている。しかしながら、数百Hz以上の繰り返し放電による加工プロセスのダイナミクスを考慮すると、帯域が数十Hzしかない電極位置決め系では、満足できる加工制御性能の実現は困難であると考えられる。ここでは、 piezo素子を用いた高速電極駆動装置を試作し、実際の加工において電極駆動系の応答周波数と加工速度との関係を明らかにする。また、電極駆動装置の高い応答性が加工速度改善に有効であることを、加工くずの挙動から定性的に説明することを試みる。

第4章では、[課題3] に関して適応型フィードフォワード制御によるCO₂ レーザ加工速度の改善について述べる。従来のレーザ発振器においては、パワーセンサの応答速度が遅いことからレーザ出力応答に制限が生じる。それは、加工テーブル移動において待ち時間の設定を必要とし、加工速度の低下につながる。ここでは、従来のレーザ出力制御であるフィードバック制御に適応型フィードフォワード制御を付加することでレーザ出力応答を改善する。フィードフォワード制御に必要なレーザ発振器の逆システムは、実際のレーザ発振に寄与する有効電力とレーザ発振のしきい値電流を中間パラメータとすることで非常に合理的なモデルとなっている。また、レーザ発振器の特性はガスの劣化やガスの温度変化により変動するが、しきい値電流を適応パラメータとしてモデル修正を行うことで、常に安定したレーザ出力の高速応答を実現できる。提案する制御系の有効性は、シミュレーションおよび実機での基本的な制御性能の評価、および実加工での加工速度の評価により検証する。

第5章では、本研究の結論を述べるとともに、今後の研究課題を示す。

第2章 外乱オブザーバによる 放電加工精度改善

2.1 はじめに

放電加工機は、電極と被加工物を絶縁性加工液中に対向して配置し、それらの間にパルス状の電圧を印加して過渡アーク放電を発生させ、被加工物を熱的に溶融加工する。したがって、放電加工機は、硬度に関係なく導電性を有する材料に対して、所望の形状を有する電極を使用することで電極形状が転写される三次元形状加工が可能であり、主に金型の加工に利用されている。

このような特徴を持つ放電加工は、非接触加工であるため切削加工のように大きな加工反力は一般に発生しないと思われがちである。ところが、電極面積が大きくなると、電極と被加工物の相対移動に伴う加工液の粘性に起因する力、放電により発生する気泡に起因する力など [27], [28], 放電加工機に機械変形を生じさせるほどの大きな加工反力が発生する場合がある。その結果、実際の加工深さが指令した加工深さよりも数十 μm 以上も浅く仕上がってしまう。そのため、所望の加工深さを得るためには、熟練作業による機械変形量を見込んだ追加工が必要となり、加工精度・加工時間の点で問題となっている [29]。

本章では、このような問題点を解決するために上記のような加工反力を機械系への外乱とみなし、外乱オブザーバを構成することにより機械変形量を推定し、その推定値に基づき加工深さ指令値を補正することを試みる [30], [31], [32], [33]。以下、第2.2節では、従来の放電加工機における加工制御系の概略と、加工深さが浅くなる問題、およびここで提案する外乱オブザーバを利用した加工制御系について説明する。第2.3節では、外乱オブザーバを構成するのに必要となる機械系モデルをモード解析により獲得した結果について示す。第2.4節では、第2.3節で決定したモデルに対して外乱オブザーバを設計し、そのオブザーバの性能をシミュレーションにより評価する。第2.5節では、実加工において機械変形の推定を行った結果、およびその推定値を用いて加工深さ指令値を補正した場合の加工深さ精度および加工時間の改善結果を示す。

2.2 放電加工機における加工制御系

2.2.1 従来の加工制御系

放電加工機における加工制御系の概略を **Fig. 2.1** に示す。本章で対象とする電極面積が大きな放電加工はZ軸方向の加工であるため、Z軸方向の電極駆動装置による加工制御系に限定して説明する。**Fig. 2.1** に示すように、放電加工は電極と被加工物を絶縁性加工液中に対向して配置し、それらの間にパルス状の電圧を印加し、過渡アーク放電を発生させ加工を行う。このとき観測される加工パルスは、**Fig. 2.2** に示すような典型的な4つの波形に分類できる。一般に、安定な放電加工状態とはスパークやアークの波形が連続して発生している状況であり、不安定な放電加工状態とはオープンやショートのパルスが多発している状況である。

放電加工機では、このような安定な放電加工状態を維持するために極間制御系が構成されている。この制御系は、極間平均電圧（電極と被加工物間の平均電圧）を検出し、その検出値が所定の設定値となるように、軌跡指令値を考慮しながら電極と被加工物の相対位置を調整する。すなわち、加工のフィードバック系の内側に電極位置のフィードバック系が構成されている。これにより、たとえばオープンの波形が多い場合には電極を被加工物に近づけ、ショートの波形が多い場合には電極を被加工物から遠ざけるように制御する。

しかしながら、加工深さが深くなると、電極と被加工物の間（極間）から加工くずが排出されにくくなり、極間制御系だけでは安定な放電加工状態を維持することが困難となる。これに対して、電極を周期的に上下運動させることで強制的に加工くずを排出するジャンプ動作制御が行われる。**Fig. 2.3** に示すように、ジャンプ動作制御ではジャンプアップ距離とジャンプダウン時間（ジャンプ動作とジャンプ動作の間の加工時間）を調整し、加工くずの排出量と生成量を制御する [17], [18], [19], [20]。

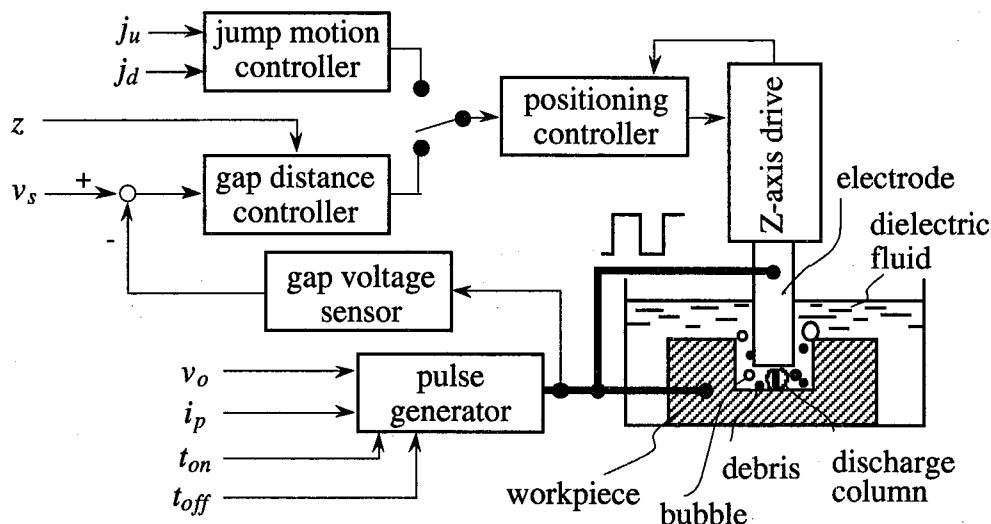


Fig. 2.1 Conventional control system for EDM.

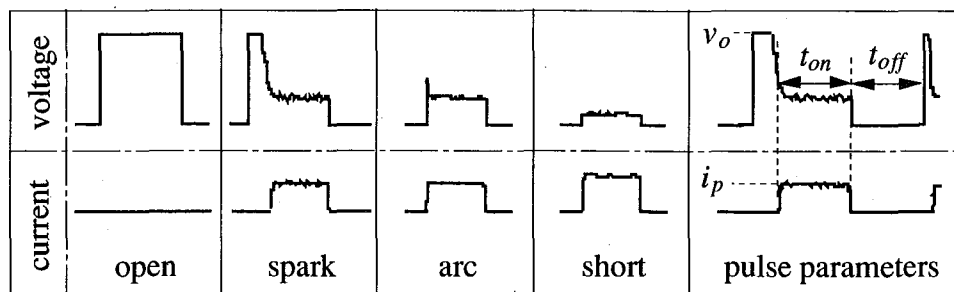


Fig. 2.2 Typical discharge waveforms.

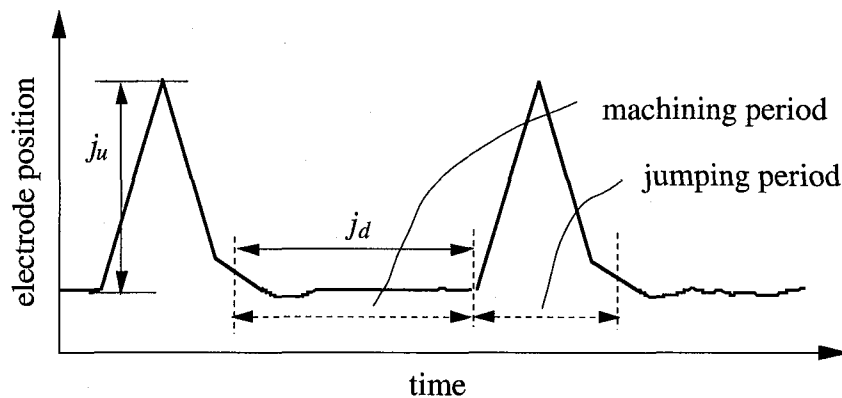


Fig. 2.3 Electrode position during machining with jump motion.

2.2.2 大面積加工時の問題点

電極面積が大きくなると、ジャンプ動作時には加工液の粘性に起因する加工反力が発生し、放電加工機本体に機械変形を生じさせる。この状況を詳しく調べるために、 z 軸方向の電極駆動装置のモータ軸に取り付けられたエンコーダ、および被加工物が置かれた定盤を基準にレーザ変位計により電極位置を検出した結果を Fig. 2.4 に示す。電極サイズ、加工条件は Fig. 2.4 に示すとおりである。Fig. 2.4 より電極を降下させていくと、エンコーダによる検出値では指令値に従って電極を送出していると判断できるが、レーザ変位計による検出値では電極が実際にはあまり送出されていない状況がわかる。これは、ジャンプ動作が終了した後加工制御が開始されると、放電が発生するまで極間距離を狭くするため電極を送りだすが、加工反力の発生により極間距離が広くなる方向に機械変形を生じ、そのため電極をさらに送り出すためである。

いま、仮に Fig. 2.4 に示すような加工深さ目標値が設定されているとすると、加工制御器ではエンコーダによる電極位置検出値により加工終了を判断するため、点 A にて加工を終了する。すなわち、放電加工機に機械変形を生じさせるほどの大きな加工反力が発生する場合には、実際の加工深さが目標加工深さよりも数十 μm 以上も浅く仕上がってしまい加工精度の点で問題がある。所望の加工深さを得るためには、さらに熟練作業による追加工が必要となり、加工時間の点でも問題となる。

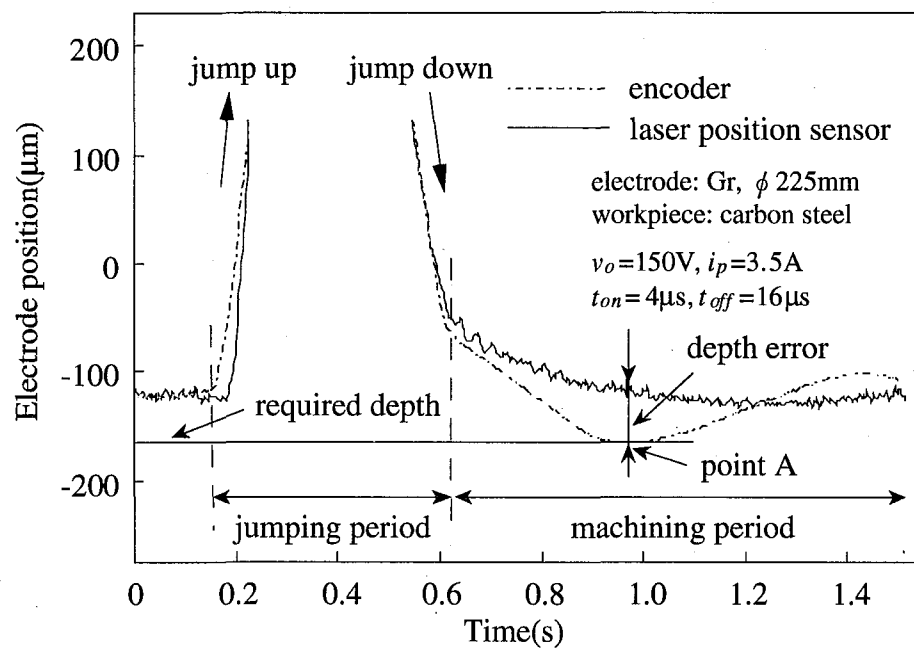


Fig. 2.4 Deformation of EDM machine by machining force.

2.2.3 外乱オブザーバを用いた加工制御系

前節で述べた大面積加工時の問題点を改善するために、加工反力を機械系への外乱とみなした外乱オブザーバ [34], [35] を構成する. 外乱オブザーバはこれまでもサーボモータ系での固体摩擦の推定とその補償に利用された例 [36], [37], [38] が報告されているが、ここでは、外乱オブザーバにより機械変形量を推定し、その推定値に基づき加工指令値の補正を行うことを提案する. すなわち、Fig. 2.5 に示すような加工制御系を構成する. このとき外乱オブザーバは、モータ電流とエンコーダ位置を入力、機械変形量の推定値を出力とする.

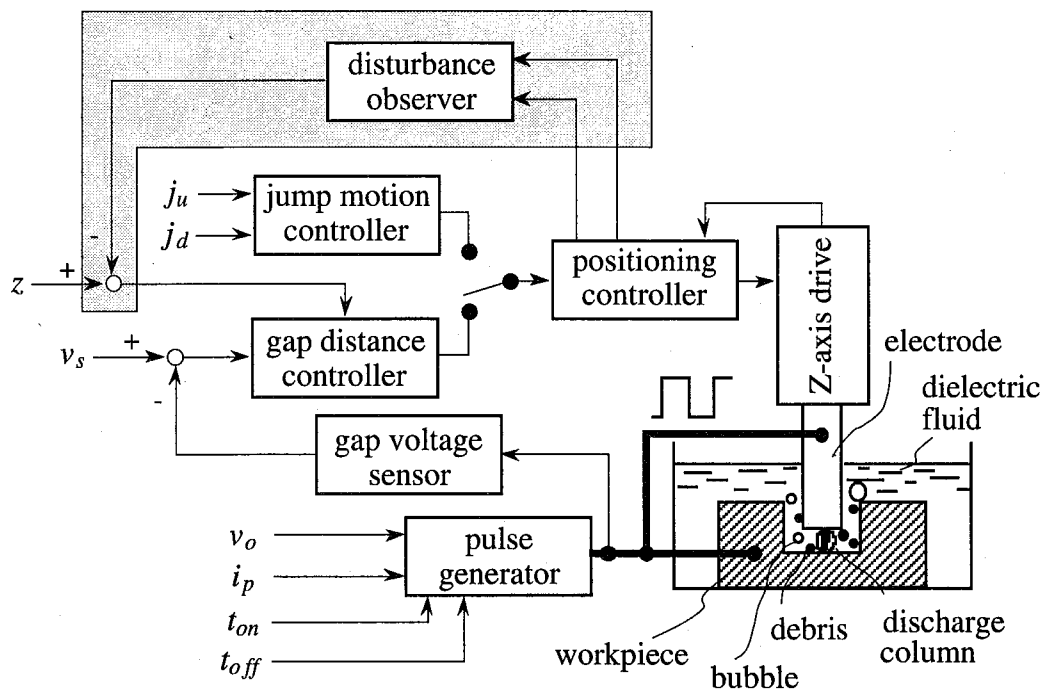


Fig. 2.5 Conventional control system with disturbance observer for EDM.

2.3 モード解析による機械系のモデル化

2.3.1 モード解析

モード解析による放電加工機のモデル化について述べる。モード解析によれば放電加工機のような複雑な機械系の伝達関数を比較的容易に得ることができる。また加工反力から実際の電極位置までの伝達関数を実測することなく解析的に得ることができる。

まず、機械系のモードを明らかにするために、Z軸の電極駆動モータを加振し、その際の実効電流値(力)から放電加工機の各点に張り付けた加速度ピックアップの出力値(加速度)までの周波数特性を測定する。

Fig. 2.6(a) および **Fig. 2.6(b)** には加速度ピックアップによる測定点を示す。また、**Fig. 2.7** には代表的な測定点におけるZ軸の電極駆動モータの実効電流値からその点での変位までの周波数特性を示す。ここで変位は、加速度ピックアップで検出された加速度を2回積分して求めている。その他の測定点における周波数特性は付録Aにまとめる。これらの周波数特性より加工機的主要共振周波数は25Hz, 75Hz, 85Hzであることがわかる。そこで、それぞれの共振周波数での振幅(ゲイン)と位相から加工機全体のモードを調べた結果を **Fig. 2.8(a)** ~ **Fig. 2.8(c)** に示す。図より以下のことがわかる。

- (1) 25Hzの共振は加工機全体を揺らしている。
- (2) 25Hzの揺れはおもに横方向であり縦方向へはあまり影響しない。
- (3) 75Hzの共振はおもにコラムの揺れである。
- (4) 電極およびヘッドは剛体とみなしてよい。
- (5) 85Hzの共振はおもにヘッドの揺れである。

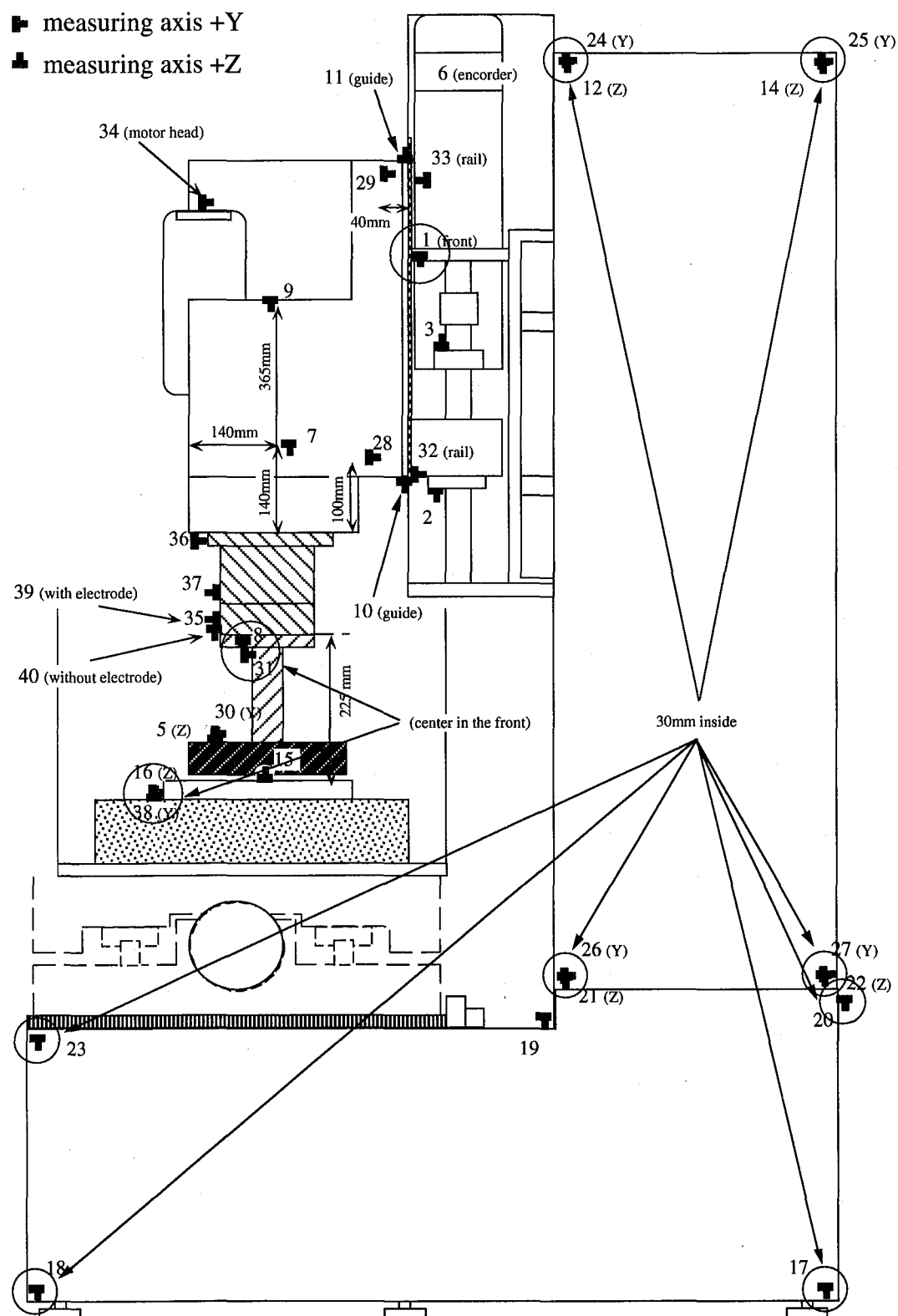


Fig. 2.6(a) Measurement locations in YZ-plane.

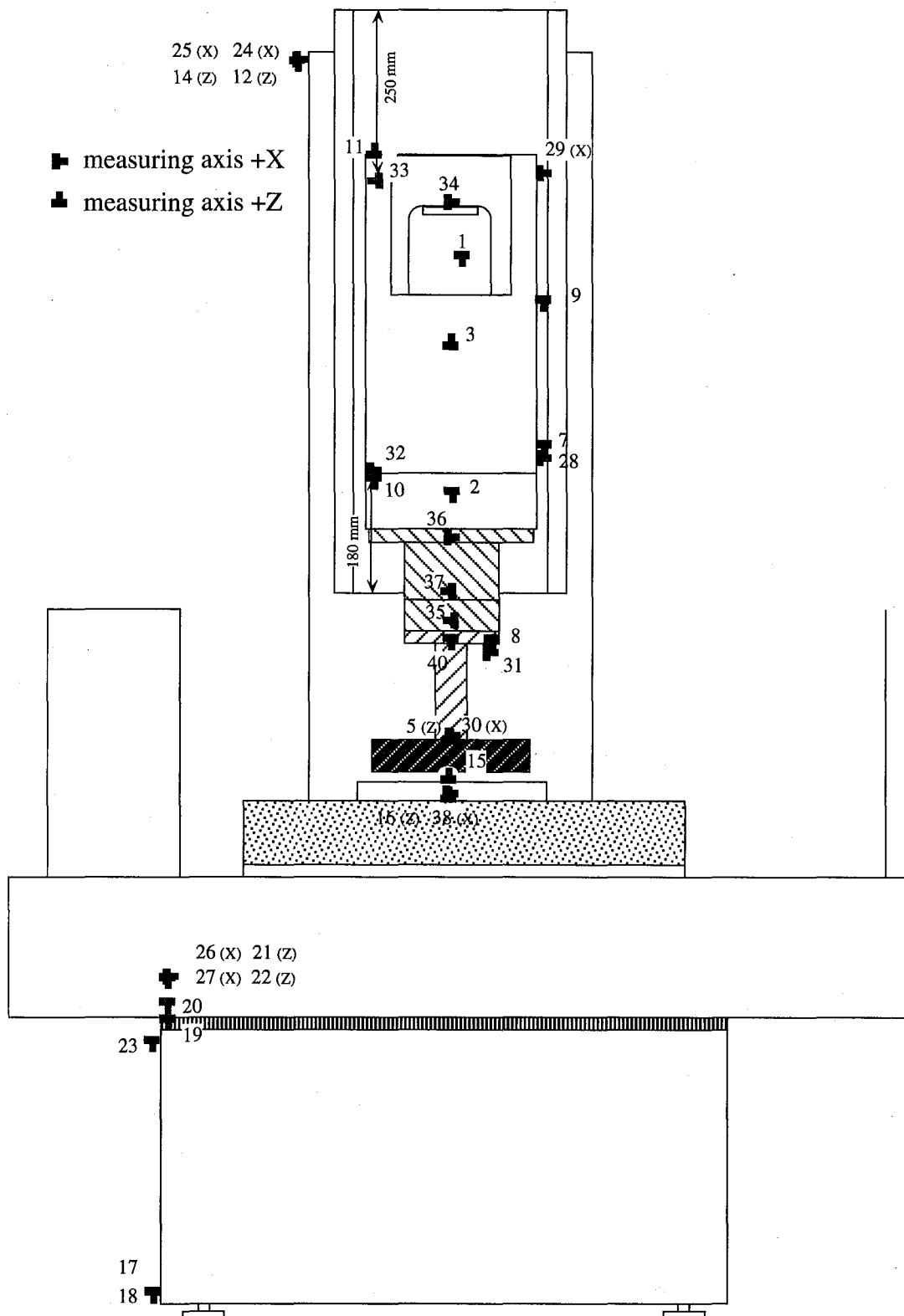
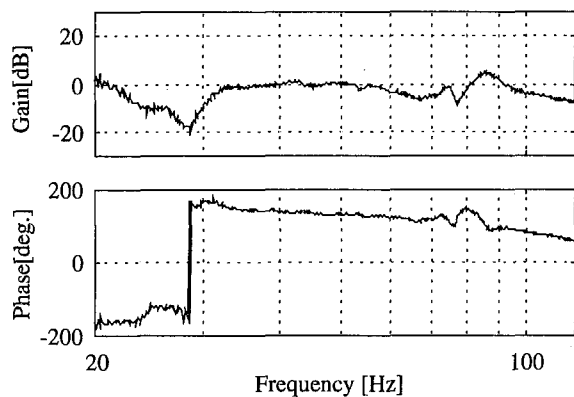
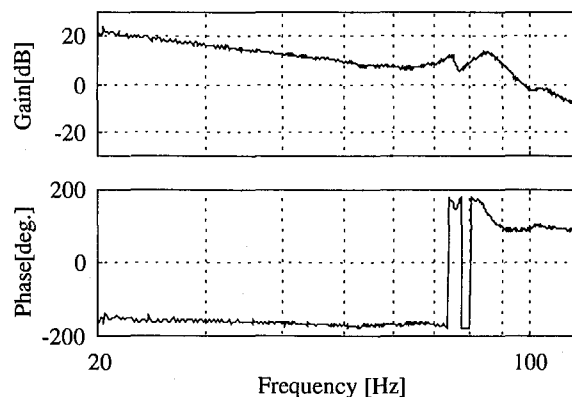


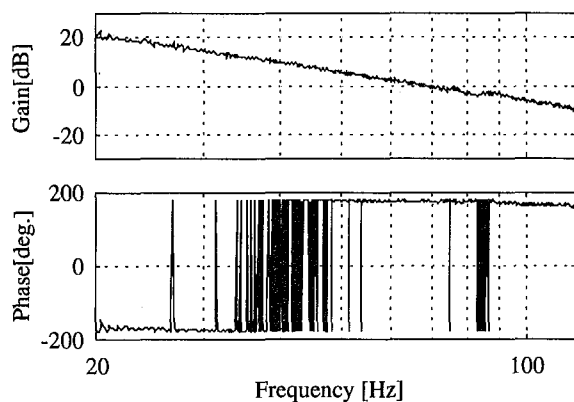
Fig. 2.6(b) Measurement locations in XZ-plane.



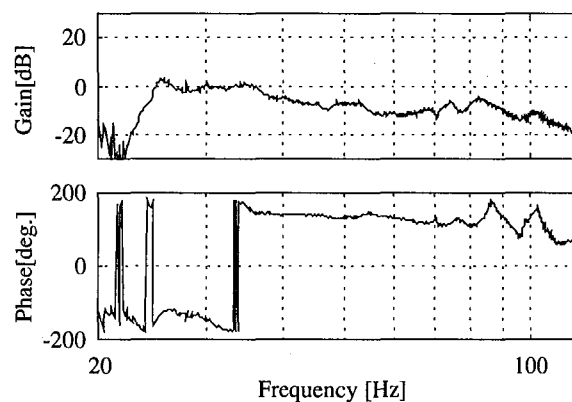
(a) location 1



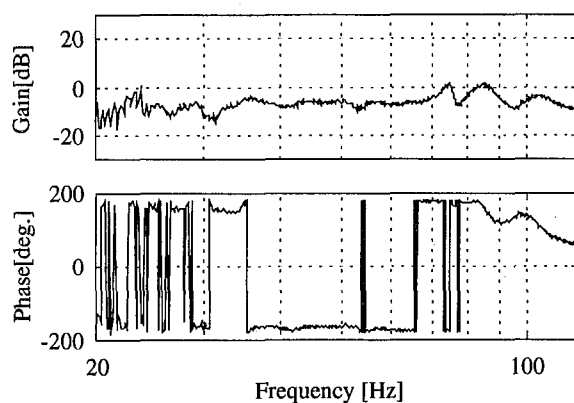
(b) location 5



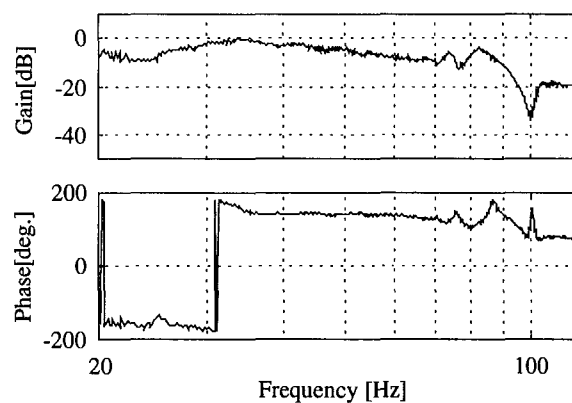
(c) location 6



(d) location 14

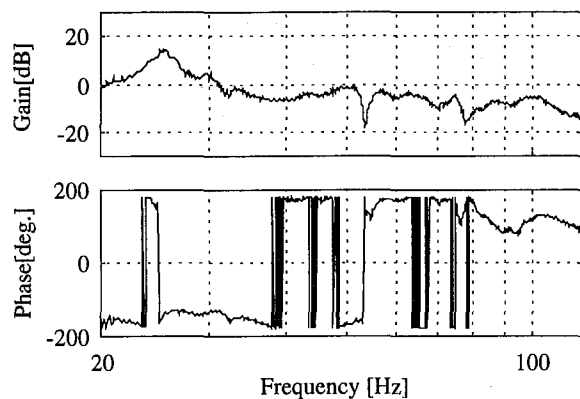


(e) location 15

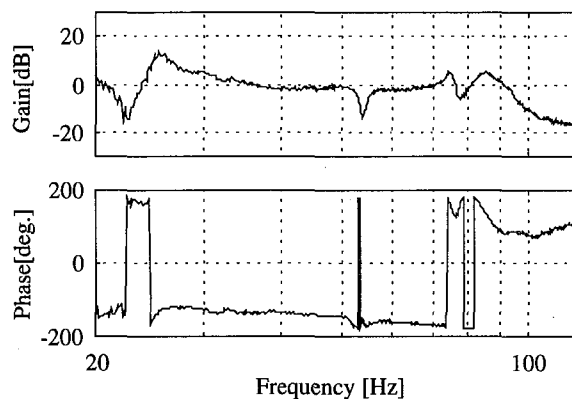


(f) location 17

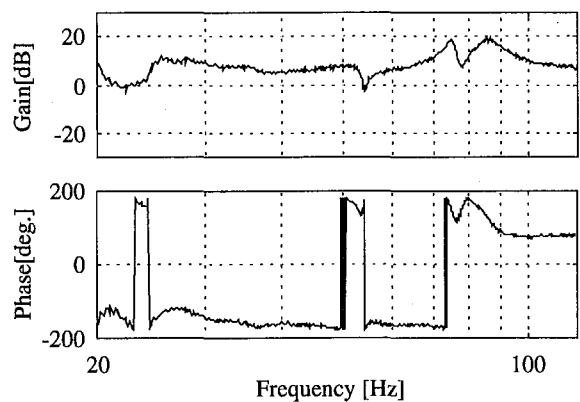
(to be continued)



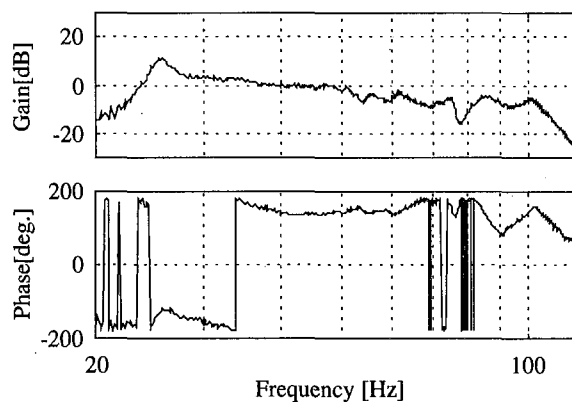
(g) location 25



(h) location 28



(i) location 30



(j) location 38

Fig. 2.7 Frequency responses at typical locations.

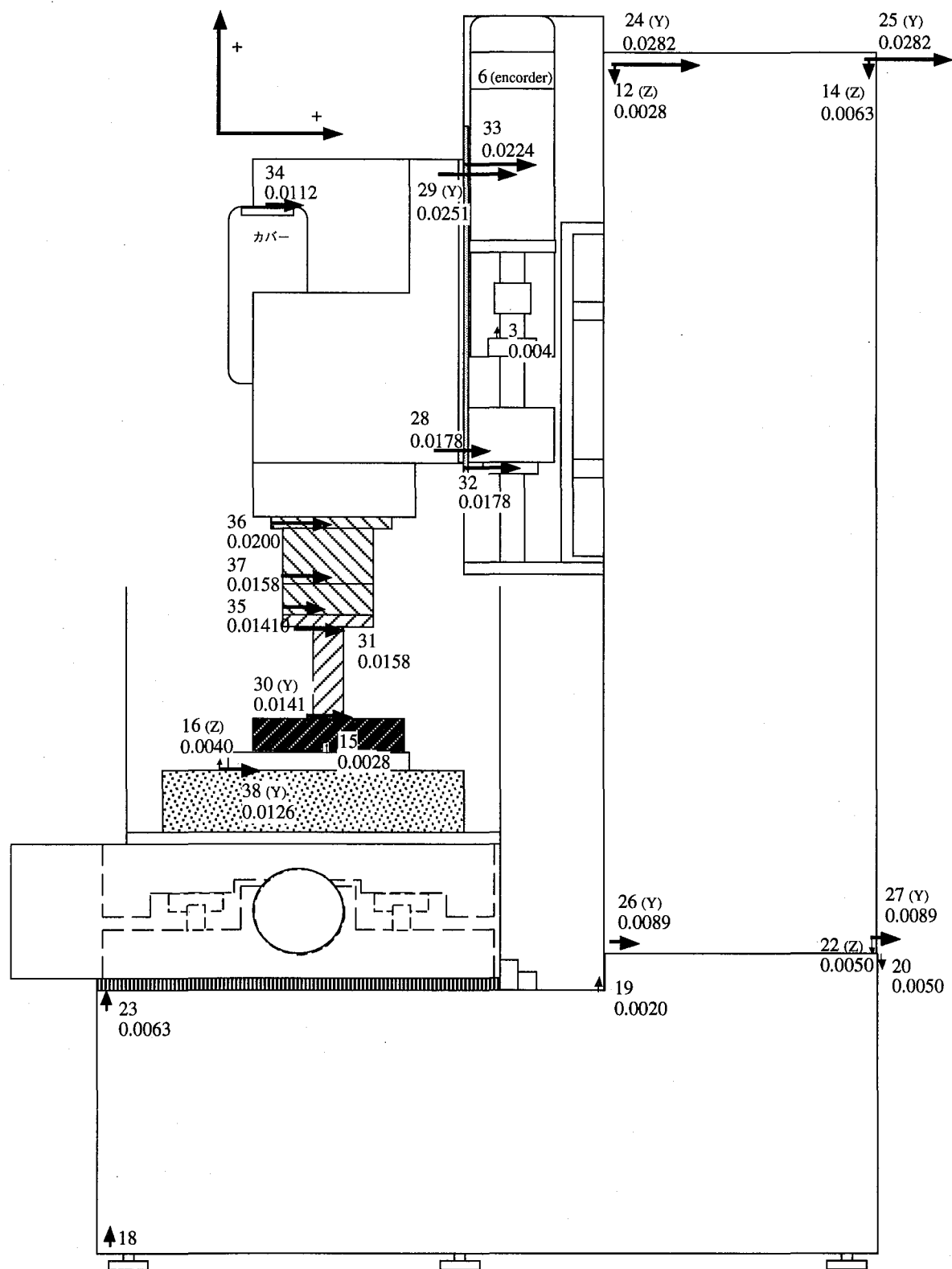


Fig. 2.8(a) Mode diagram at 25Hz.

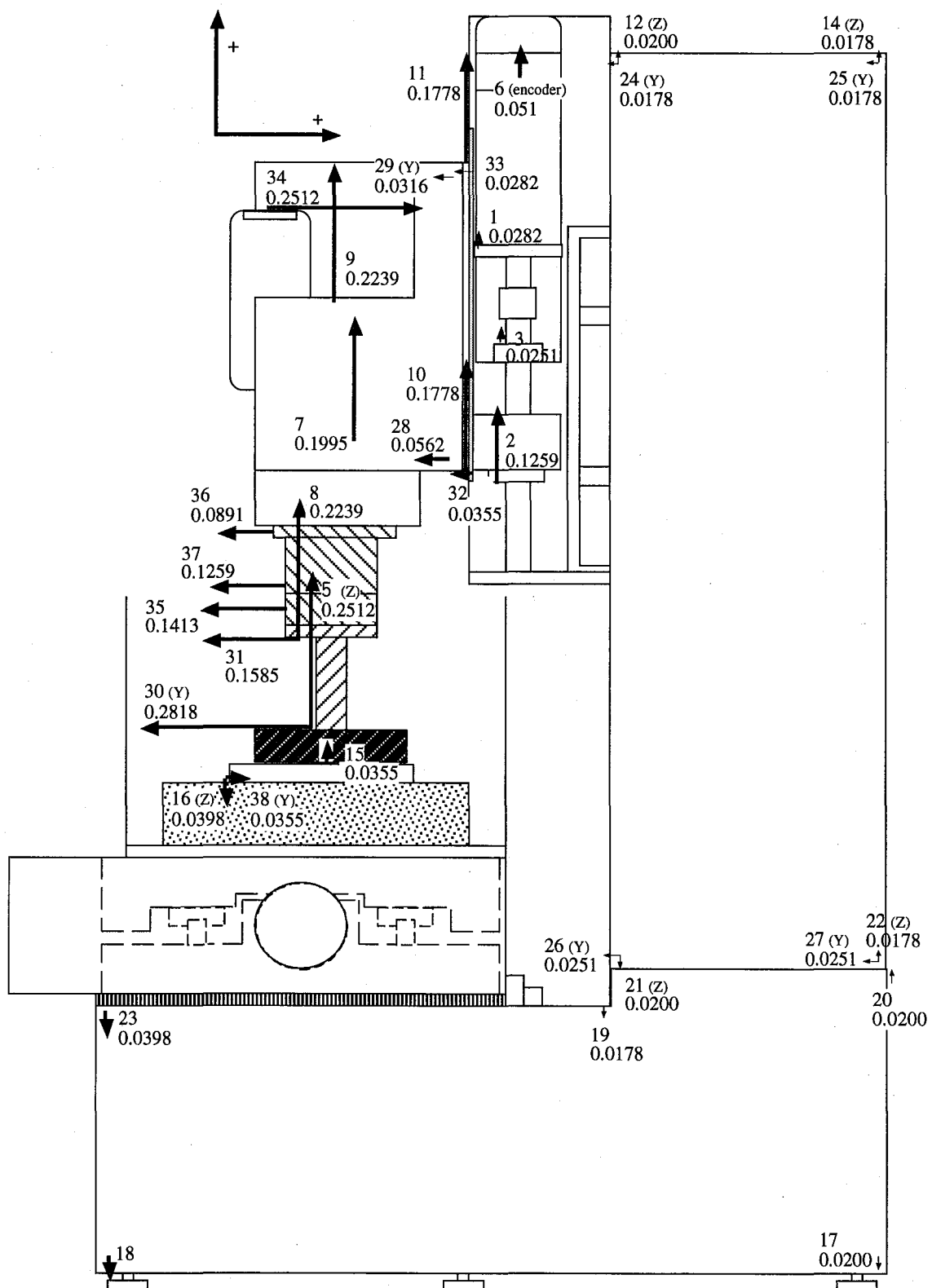


Fig. 2.8(b) Mode diagram at 75Hz.

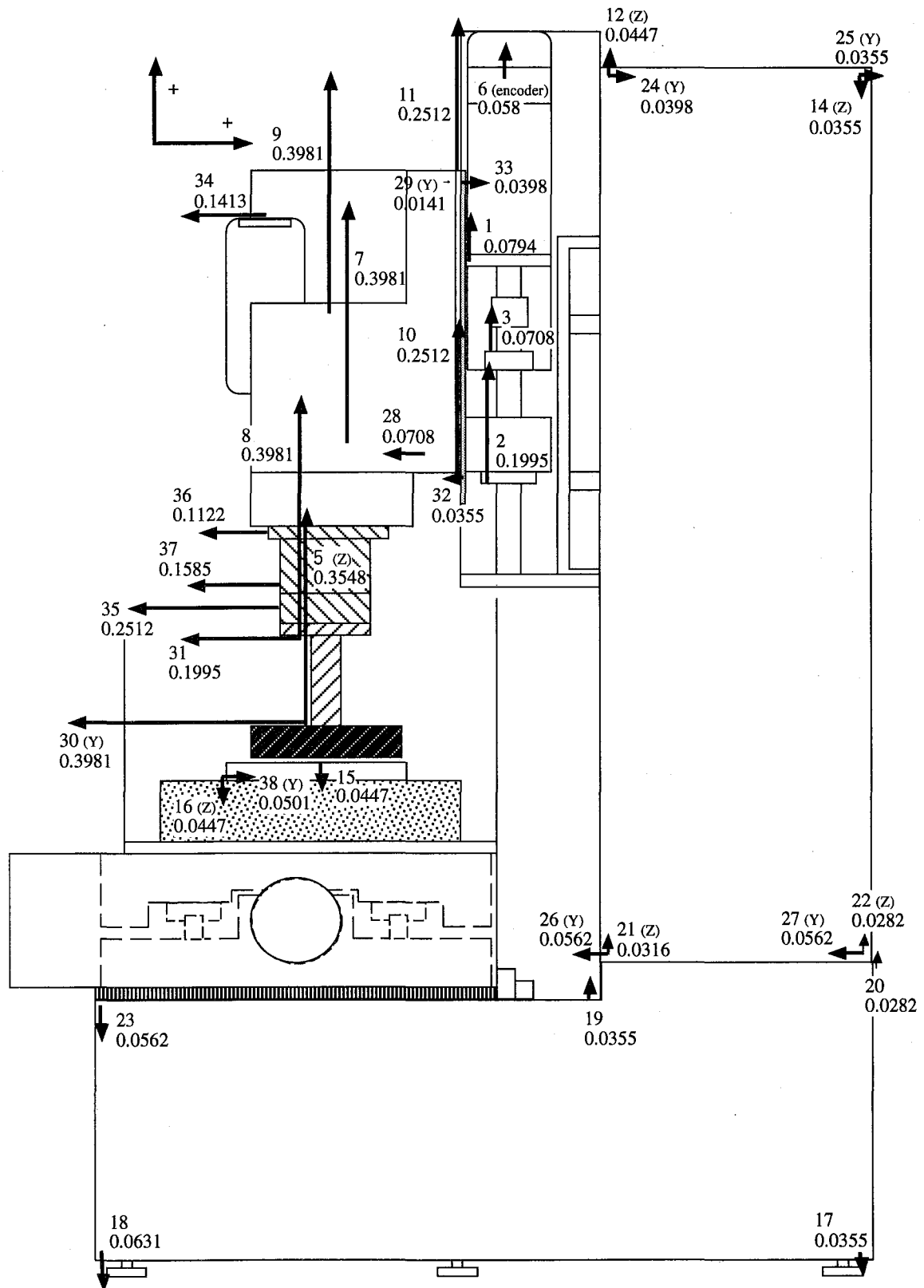


Fig. 2.8(c) Mode diagram at 85Hz.

2.3.2 モードモデルの決定

モード解析の結果をもとに、外乱オブザーバを構成するための機械系モデルの決定を行う。Fig. 2.9 にモデル化における各変数を示す。図において f_1 はモータにより機械系に加えられる力、 f_2 は電極に作用する加工反力、 f_3 は被加工物に作用する加工反力、また、 x_1 はエンコーダにより検出される電極の位置、 x_2 は電極の位置、 x_3 は被加工物の位置である。図を参照して機械系モデルを (2.1a)、(2.1b) 式のように定義し、それぞれの伝達関数をモード解析 [39] により決定する。

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \\ X_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) & H_{13}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) & H_{23}(s) \\ H_{31}(s) & H_{32}(s) & H_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(s) \\ F_2(s) \\ F_3(s) \end{bmatrix} \quad (2.1a)$$

$$H_{ij}(s) = \frac{X_i(s)}{F_j(s)} = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_{ir}\phi_{jr}}{m_r s^2 + c_r s + k_r} \quad (2.1b)$$

そこで、まず電極駆動用モータにより機械系を加振し、その際のモータ電流値、エンコーダの検出値、電極および被加工物に張り付けた加速度センサの出力を計測し、モータにより機械系に加えられる力 f_1 からそれぞれの位置 x_1 , x_2 , x_3 までの伝達関数を測定する。その結果を Fig. 2.10 に実線で示す。測定した周波数応答より Z 軸方向での加工機の共振周波数は 75Hz と 85Hz であることがわかる。

つぎに測定した結果（実線）からカーブフィットによりモーダルパラメータを決定し、伝達関数 $H_{11}(s)$, $H_{21}(s)$, $H_{31}(s)$ を求める。ここでのカーブフィットは、上記の 75Hz, 85Hz の共振系に対応する二つのモードと質量補正項の重ね合わせとして最小二乗法により行う。その結果を Fig. 2.10 に点線で示すが、非常によいカーブフィットが行われていることがわかる。さらに (2.1a) 式に示される残りの伝達関数を $H_{11}(s)$, $H_{21}(s)$, $H_{31}(s)$ から解析的に求める。相反定理から $H_{12}(s)=H_{21}(s)$, $H_{13}(s)=H_{31}(s)$, $H_{23}(s)=H_{32}(s)$ が成り立つ。Fig. 2.11 に決定したすべての周波数特性を示す。

最後に (2.1a), (2.1b) 式の伝達関数表現された機械系のモデルを (2.2a) ~ (2.2b) 式の状態空間表現に変換する。エンコーダの位置信号を出力とした場合の (A_p , B_p , C_p , N) を (2.2c) 式に示す。

[機械系のモデル]

$$\frac{d}{dt}x_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_p(t) + N d(t) \quad (2.2a)$$

$$y_p(t) = C_p x_p(t) \quad (2.2b)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} -7.59 & -2.25 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4.27 \times 10^1 & -2.85 \times 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 9.36 \\ 0 \\ 2.76 \times 10^1 \\ 0 \\ 4.37 \times 10^2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} -3.47 \times 10^2 \\ 0 \\ -2.21 \times 10^3 \\ 0 \\ 4.06 \times 10^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_p = [0 \quad 9.36 \quad 0 \quad 2.76 \times 10^1 \quad 0 \quad 4.37 \times 10^2] \quad (2.2c)$$

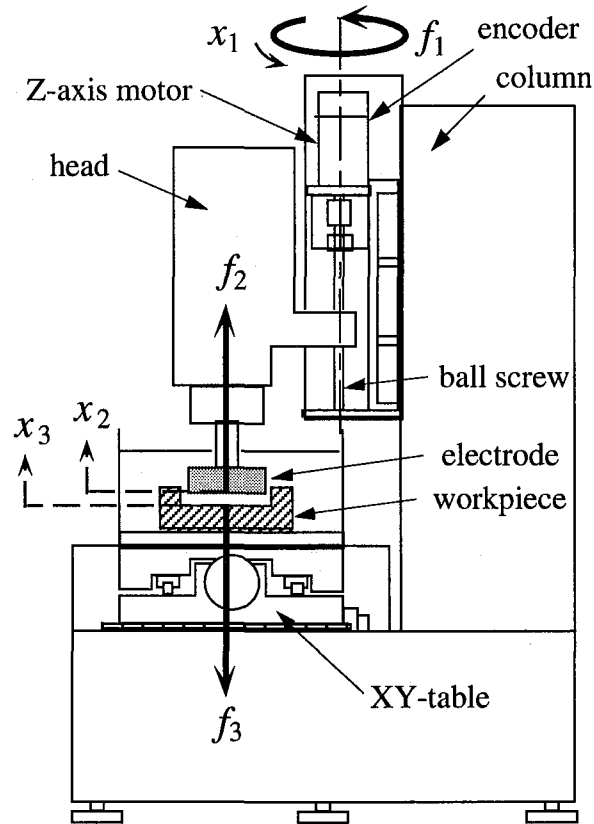


Fig. 2.9 Definition of inputs and outputs of mechanical model.

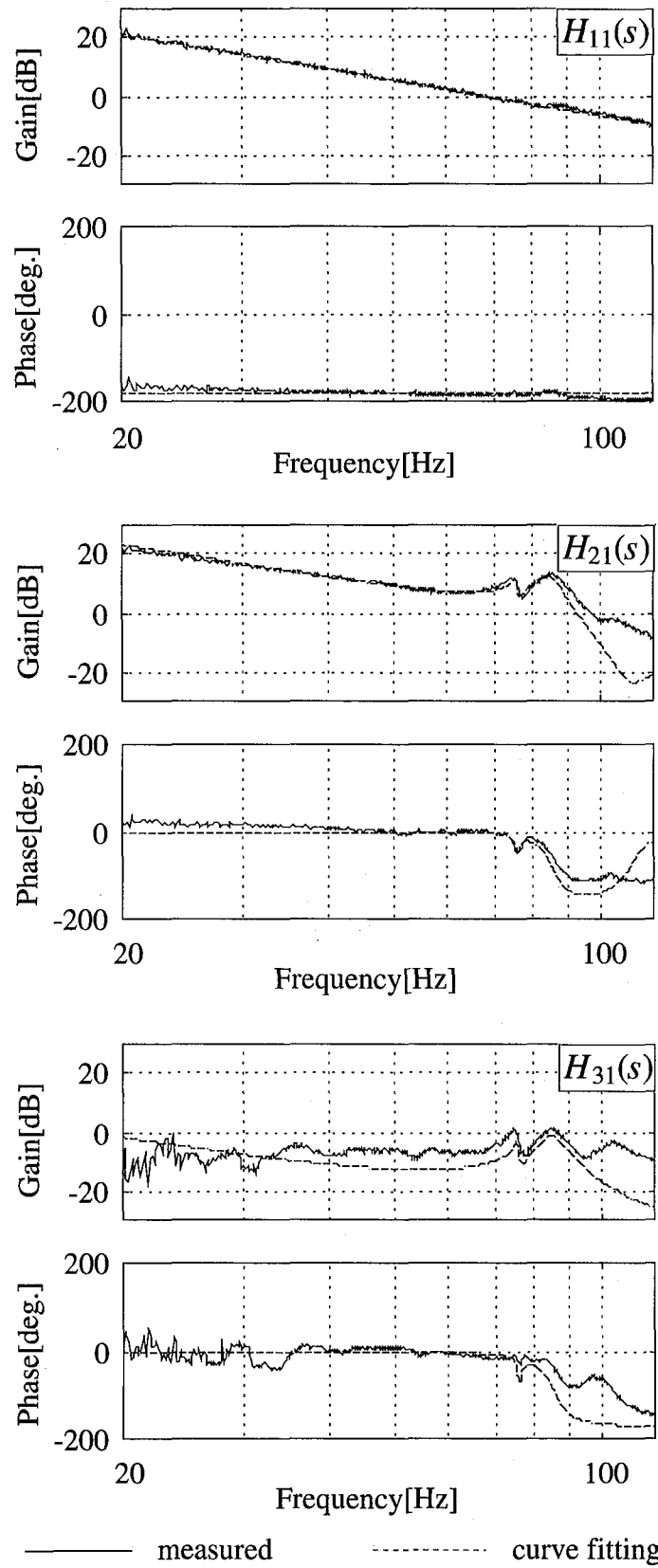


Fig. 2.10 Curve fitting on measured frequency responses.

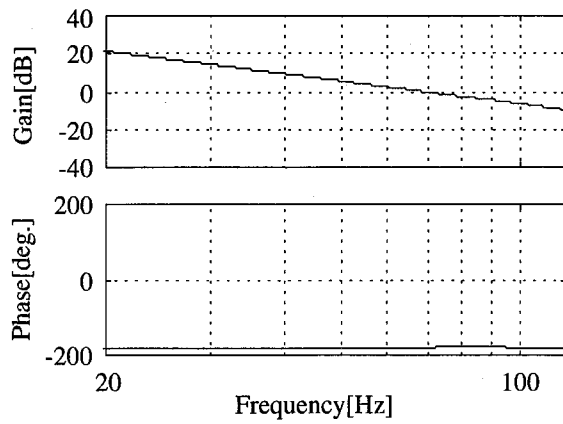
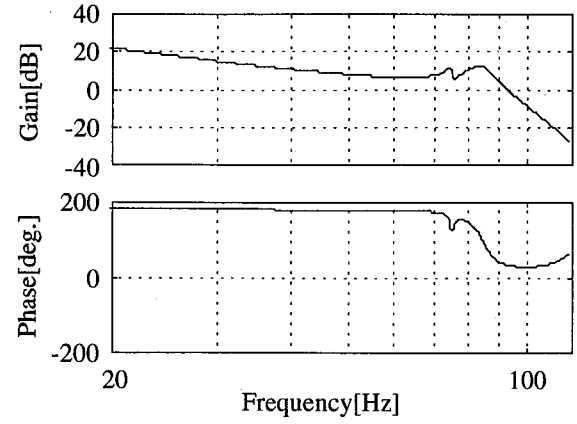
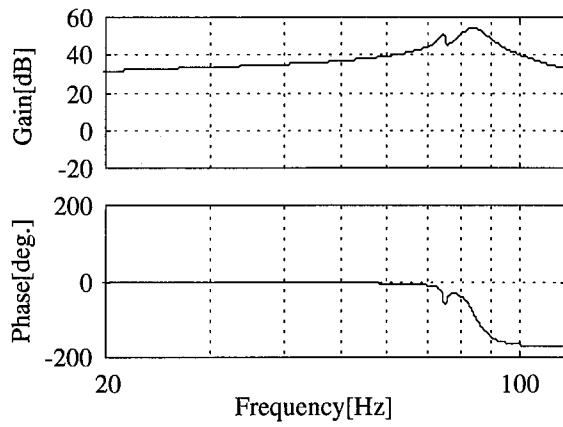
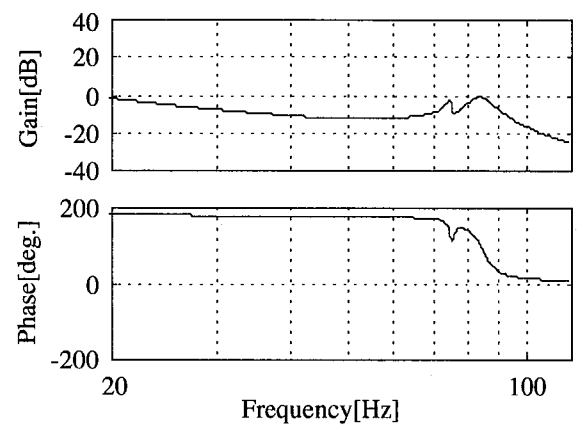
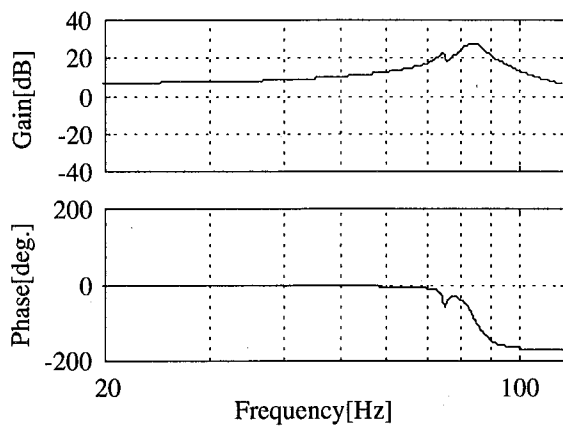
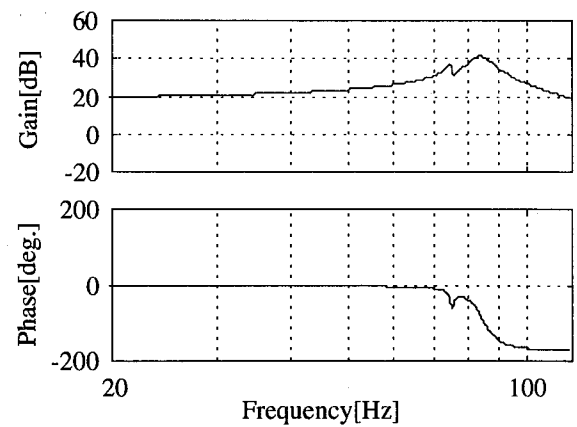
(a) $H_{11}(s)$ (b) $H_{12}(s)=H_{21}(s)$ (c) $H_{22}(s)$ (d) $H_{13}(s)=H_{31}(s)$ (e) $H_{33}(s)$ (f) $H_{23}(s)=H_{32}(s)$

Fig. 2.11 Frequency responses of modal model.

2.4 外乱オブザーバの構成

制御対象が (2.2a) ～ (2.2c) 式, 外乱特性が (2.3a), (2.3b) 式, その拡大系が (2.4a) ～ (2.4c) 式で記述されるとき, その拡大系に対するオブザーバが構成できるならば, その状態変数と外乱の両方を推定できる [35] .

[外乱のモデル]

$$\frac{d}{dt}\xi(t) = \Gamma\xi(t) \quad (2.3a)$$

$$d(t) = H\xi(t) \quad (2.3b)$$

[拡大系]

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Bu_p(t) \quad (2.4a)$$

$$y_p(t) = Cx(t) \quad (2.4b)$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_p(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_p & NH \\ 0 & \Gamma \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [C_p \ 0] \quad (2.4c)$$

実際の加工反力は連続的に変化している. ここでは, 加工反力をステップ状外乱と仮定する. この時, (2.2a) ～ (2.2c) 式で表される制御対象は可観測であることから, 拡大系に対するオブザーバは以下のように構成できる. なお, (2.5a) 式における K はオブザーバゲイン, (2.5b) 式における C_1, C_2 は出力をそれぞれ機械変形量および外乱とするための行ベクトルである.

[オブザーバ]

$$\frac{d}{dt}\hat{x}(t) = A\hat{x}(t) + Bu_p(t) + K(y_p(t) - C\hat{x}(t)) \quad (2.5a)$$

$$\hat{y}(t) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \hat{x}(t) \quad (2.5b)$$

オブザーバゲインの設計は双対なシステムに対する最適制御理論を利用する [40] . すなわち, (2.6) 式の 2 次形式評価関数を最小とするオブザーバゲインは $A=A^T$, $B=C^T$ として (2.7) 式のリカッティ方程式の定常解 P を用いて (2.8) 式で与えられる. ただし, R は正定な対称行列, Q は非負定な対称行列である.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (2.6)$$

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} R B^T P = 0 \quad (2.7)$$

$$K = -R^{-1} B^T P \quad (2.8)$$

そこで、 R と Q を変化させ、オブザーバの極がどのように配置されるかを調べ、設計されたオブザーバの性能をシミュレーションにより評価する。シミュレーションでは、**Fig. 2.12**に示すように、前節で得られた機械系モデルを用い、電極位置指令は電極を徐々に被加工物へ近づける場合とし、図中に示すスキーズ効果による加工反力が発生するものとする。最終的に決定された R と Q 、オブザーバの極は以下のようになる。(2.9)式において、 $\mathbf{I}_6$ は (6×6) の単位行列をあらわす。また、**Fig. 2.13**にはシミュレーション結果を示すが、設計したオブザーバはシミュレーションにおける機械変形量および加工反力の真値を良好に推定できている。

$$Q = 1 \times 10^3 \begin{bmatrix} \mathbf{I}_6 & 0 \\ 0 & 1 \times 10^3 \end{bmatrix}, \quad R = 0.1 \quad (2.9)$$

[オブザーバの極]

$$\begin{aligned} & -4.3799 \times 10^4, \\ & -6.2262 \times 10^4 \pm j 4.7434 \times 10^2, \\ & -2.7439 \times 10^1 \pm j 5.3301 \times 10^2, \\ & -8.0789 \times 10^1 \pm j 7.9467 \times 10^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

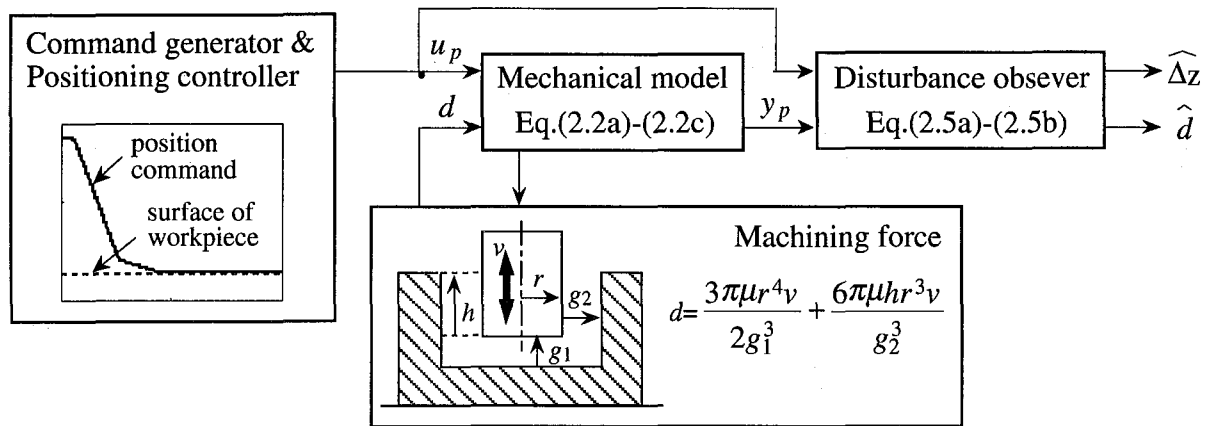


Fig. 2.12 Block diagram of simulation model.

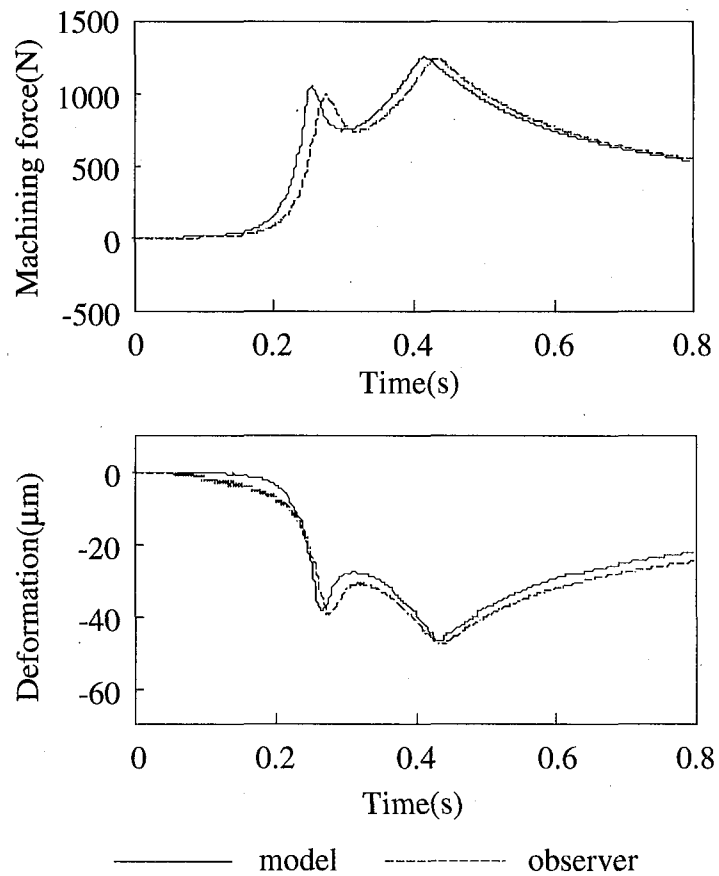


Fig. 2.13 Simulation results of disturbance observer.

2.5 加工実験

2.5.1 電極位置の推定

前節で設計した外乱オブザーバを実際に DSP(Digital Signal Processor) を用いた専用コントローラに実現し、実加工において機械変形量や加工反力の推定を行なう。ここでは、前節で設計した連続系のオブザーバから、サンプリング周期 $200\mu\text{s}$ とし、双一次変換により離散系オブザーバを構成する。Photo 2.1 に加工実験の構成を示すが、オブザーバによる推定結果と実際の電極位置を比較するためにレーザー変位計を配置している。電極は $\phi 250\text{mm}$ の円柱形状のグラファイト電極、被加工物は SKD-11 である。実験は、加工反力が発生するような状況、すなわち 3 時間ほど加工を行い、加工深さが約 0.7mm ほどになった時点で仕上げ加工条件により行った。Fig. 2.14 にエンコーダにより検出した電極位置、レーザー変位計により検出した電極位置、およびオブザーバにより推定した電極位置を示す。図よりエンコーダにより検出した電極位置とレーザー変位計により検出した電極位置は、ジャンプ動作終了後の加工中に約 $130\mu\text{m}$ の差を生じており、加工反力による機械変形が発生していることがわかる。また、オブザーバにより推定した電極位置とレーザー変位計により検出した電極位置とは非常によく一致している。これは、オブザーバの推定速度と比較して外乱が比較的ゆっくりと変化しているためと考えられる。

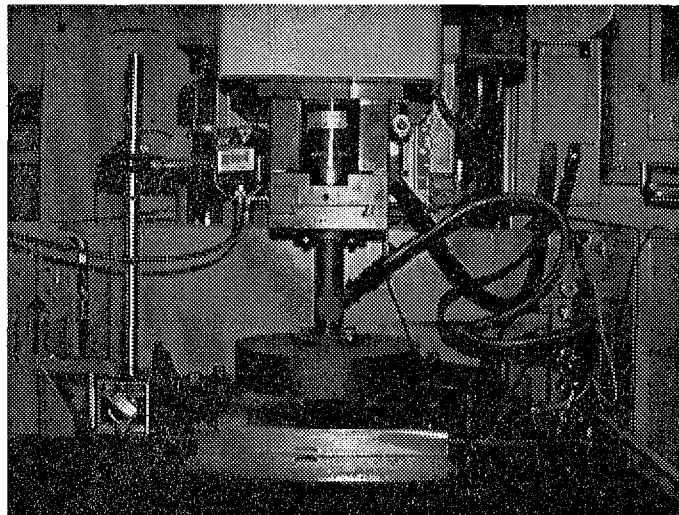


Photo 2.1 Experimental set-up.

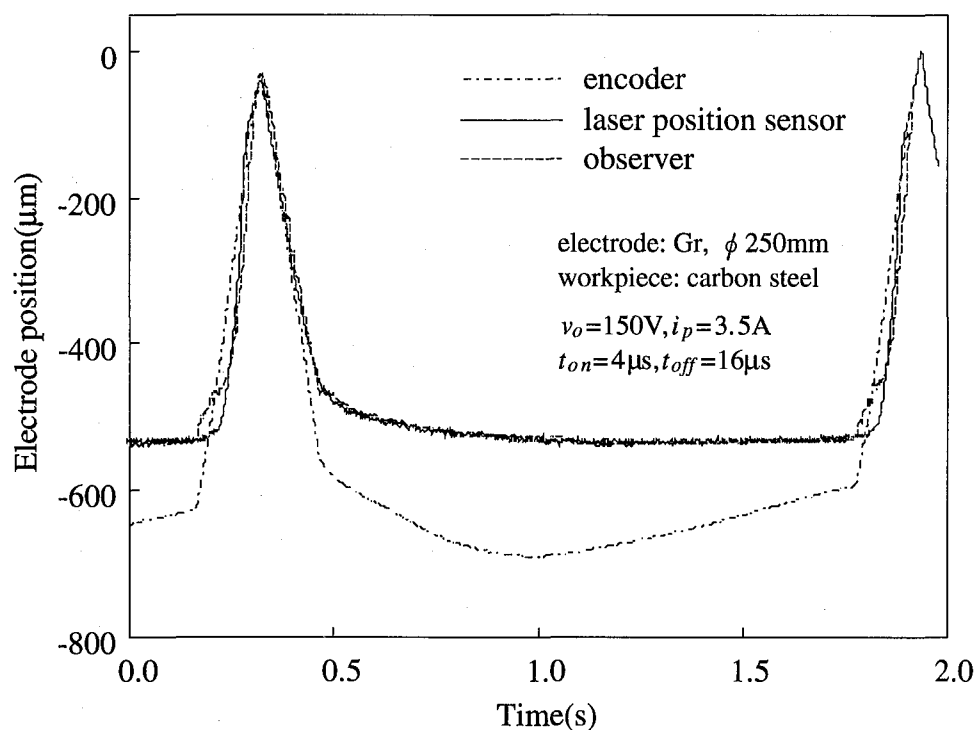


Fig. 2.14 Estimation results at finish machining with jump motion.

2.5.2 加工深さ精度の改善

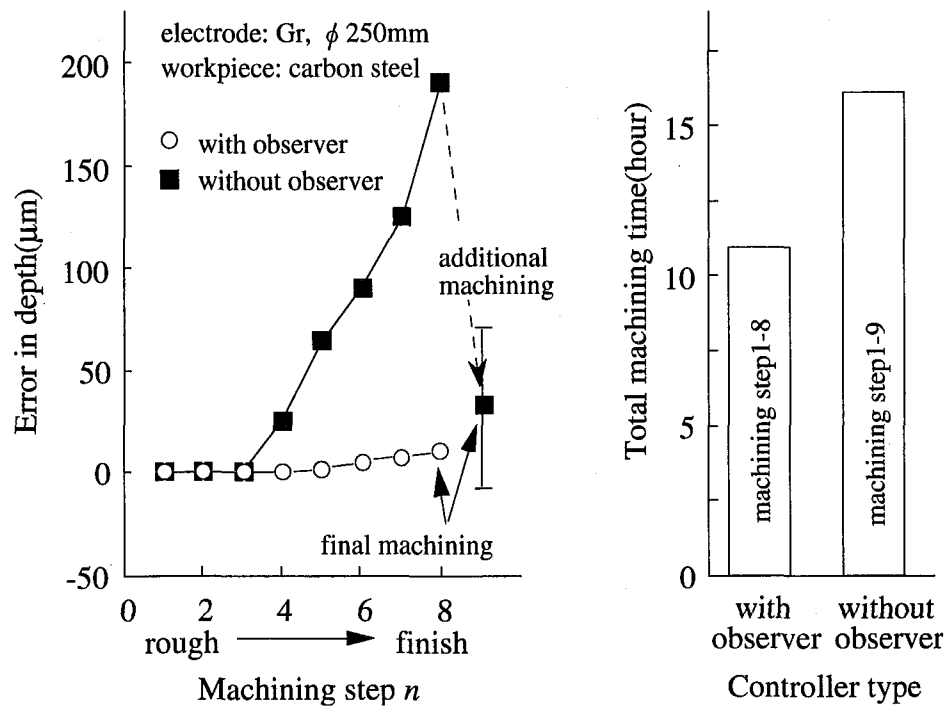
前節において、オブザーバにより実際の電極位置を良好に推定できることが確認できたので、ここでは多段加工において、推定した機械変形量により目標位置を補正することにより加工深さ精度の改善を試みる。(Fig. 2.5 を参照)。

多段加工とは、所望の加工形状を荒加工から仕上げ加工へと複数の加工条件で加工を順々に進める加工法である。ここでの加工条件を **Table 2.1** にまとめる。左に示す番号 (1 ~ 9) は加工段数を示す。**Fig. 15** には従来の加工制御系により加工した場合とここで提案した制御系により加工した場合のそれぞれの加工段における加工深さ誤差を示す。図より従来の制御系では仕上げ加工になるほど加工深さ誤差が増大していることがわかる。これは、仕上げ加工の方が、極間距離が狭くなり加工反力が大きいと推測される。一方、提案する制御系ではほとんど加工深さ誤差を発生していないことがわかる。

したがって、従来の制御系では所望の加工深さを得るために追加工が不可欠となる。このとき、追加工量は機械変形量を見込んで設定する必要がある、熟練を要すると同時に 1 回の追加工で所望の深さを実現できるとは限らない。(Fig. 2.15 において追加工時の誤差に幅を持つのはこのためである) これに対して提案する制御系では追加工の必要はない。その結果、全加工時間は従来の制御系による加工に比べて約 40% ほど短縮することが可能となった。

Table 2.1 Stepping machining parameters.

n	$v_o(\text{V})$	$i_p(\text{A})$	$t_{on}(\mu\text{s})$	$t_{off}(\mu\text{s})$	$j_u(\mu\text{m})$	$j_d(\text{s})$
1	80	55.0	256	128	600	1.54
2	80	35.0	218	32	600	1.54
3	80	25.0	166	32	600	1.99
4	80	15.0	102	32	600	1.99
5	80	10.0	78	32	600	1.99
6	150	8.0	64	32	600	1.99
7	150	5.5	32	32	600	1.99
8	150	3.5	4	8	600	1.99
9	150	3.5	4	8	600	1.99

**Fig. 2.15** Improvement of machining accuracy and time in stepping machining using disturbance observer.

2.6 おわりに

放電加工機では大面積加工時において、大きな加工反力が発生し加工機が機械変形を起こすような場合に、指令した加工深さよりも浅く仕上がるという問題があった。本章では、この問題を解決するために外乱オブザーバを用いて、加工反力および機械変形を推定し、機械変形量の推定値により加工指令値を補償することを提案した。まず、オブザーバを設計するにあたり、放電加工機の機械系のモデル化をモード解析により行った。つぎに、得られた機械系のモデルを用い、加工反力をステップ状外乱と見なしてオブザーバを設計し、シミュレーションおよび実加工において機械変形量を良好に推定できることを確認した。さらに、機械変形量の推定値により加工指令値の補償を行い、従来の場合とで加工深さ精度の比較実験を行った。その結果、ここで提案する制御系により加工深さ精度の悪化を招くことなく、従来必要であった追加工をなくすことが可能となり、従来に比べて約40%の加工時間短縮を実現することができた。

第3章 高速電極駆動装置による 放電加工速度改善

3.1 はじめに

近年、放電加工機は従来の金型製作分野だけでなく機械部品加工にも広く利用されつつあり、加工速度の向上に対する要求が高まっている。加工速度向上のためには、安定な放電加工状態をいかに維持するかが重要な課題である。従来、安定な放電加工状態を維持するために、例えば放電加工状態を極間平均電圧により検出しその検出値が一定となるように加工電極位置を調節する極間制御系が構成されてきた。しかしながら、数百 Hz 以上の繰り返し過渡アーク放電による加工プロセスのダイナミクスを考慮すれば、帯域が数十 Hz しかない極間制御系による制御性能には限界があると予想される。これまでもこのような点に着目し加工用電源系での最小分散制御 [11]、微細加工領域においてのボイスコイルや圧電素子を用いた電極駆動装置 [41], [42]、またマシニングセンタやロボットでの放電加工における専用電極駆動ユニット [43], [44] などにより加工速度が改善されたという報告がある。

本章では、これらの結果を踏まえ従来の放電加工機に付加することができる高速電極駆動装置を製作し、電極駆動系的高速応答が、どのように加工状態を安定化するか、そしてどのような加工領域において加工速度改善を実現できるかについて詳しく検証する [45], [46], [47]。以下、第 3.2 節では、試作した高速電極駆動装置の概略について説明する。第 3.3 節では、高速電極駆動装置による極間制御系を構成し、電極駆動系の応答性がどのように加工速度改善に寄与するかをジャンプ加工、噴出加工、そして微細穴加工において検証する。第 3.4 節では、第 3.3 節で得られる加工速度改善結果に対して加工くずの挙動から定性的に説明を加える。

3.2 高速電極駆動装置の概略

試作した高速電極駆動装置の構造を **Fig. 3.1** に示す。この駆動装置では、高速応答の実現および電極の駆動方向以外への偏位を最小にするために、円筒状のダイヤフラム構造とし中央に圧電素子を配置している。そして圧電素子はヒステリシス特性を有するため、光学式変位センサーによる位置ループ系を構成することで指令電圧に比例した変位を得ている。**Table 3.1** に高速電極駆動装置の諸特性を示す。

Fig. 3.1 に示す高速電極駆動装置を従来機の Z 軸に取付け極間制御系を構成する。

Fig. 3.2 は極間制御系のブロック図である。この制御系では、極間平均電圧が常に一定となるように、高速電極駆動装置が主に間隙距離を調節するとともに従来機の Z 軸がジャンプ動作や加工の進みに対応した平均的な電極送りを行なう。また、高速電極駆動装置のストロークでは不安定な加工状態を回避するのに不十分な場合には従来の Z 軸が協調動作する。したがって、通常の加工状態は高速電極駆動装置の応答特性に支配され、その応答周波数を Fig. 3.2 のローパスフィルタの帯域を調整することで変更する。Fig. 3.3 は高速電極駆動装置だけの位置ループ特性、および 30Hz と 300Hz に設定されたローパスフィルタを含めた高速電極駆動装置の見かけ上の位置ループ特性を示す。Photo 3.1 は高速電極駆動装置を従来の放電加工機に取付けた様子を示す。

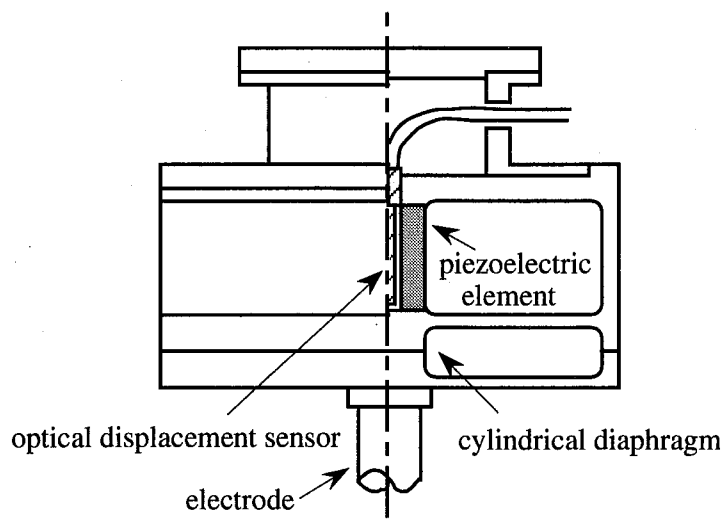


Fig. 3.1 Schematic diagram of H.F.R. actuator.

Table 3.1 Specifications of H.F.R. actuator.

shape of piezo-element (mm)	cylinder (inner=8, outer=20, high=52)
driving voltage(v)	0-800
maximum stroke(μm)	± 14 (± 7 at load=1kg, freq.=800Hz)
freq. of position loop(Hz)	max. 800
resolution in position(μm)	<0.1
position error (dB)	<-30 (X/Z, Y/Z at 0-1kHz)

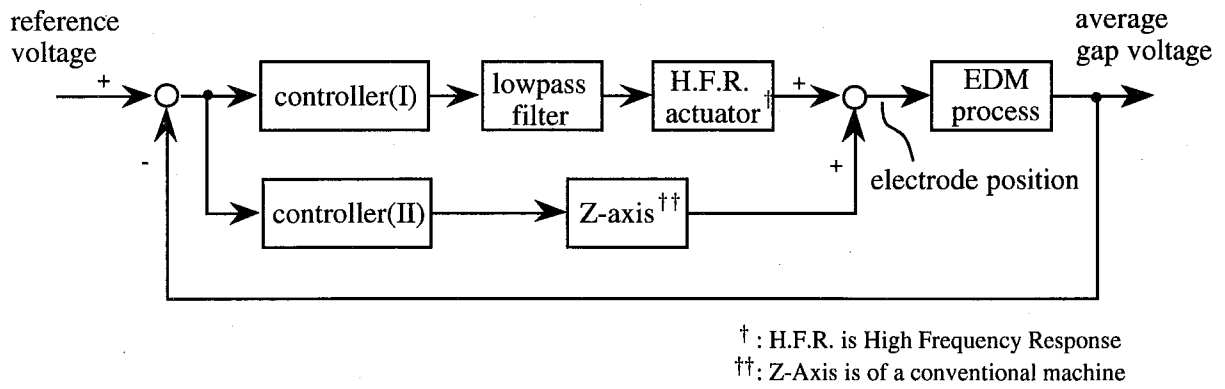


Fig. 3.2 Block diagram of gap distance control system with H.F.R. actuator.

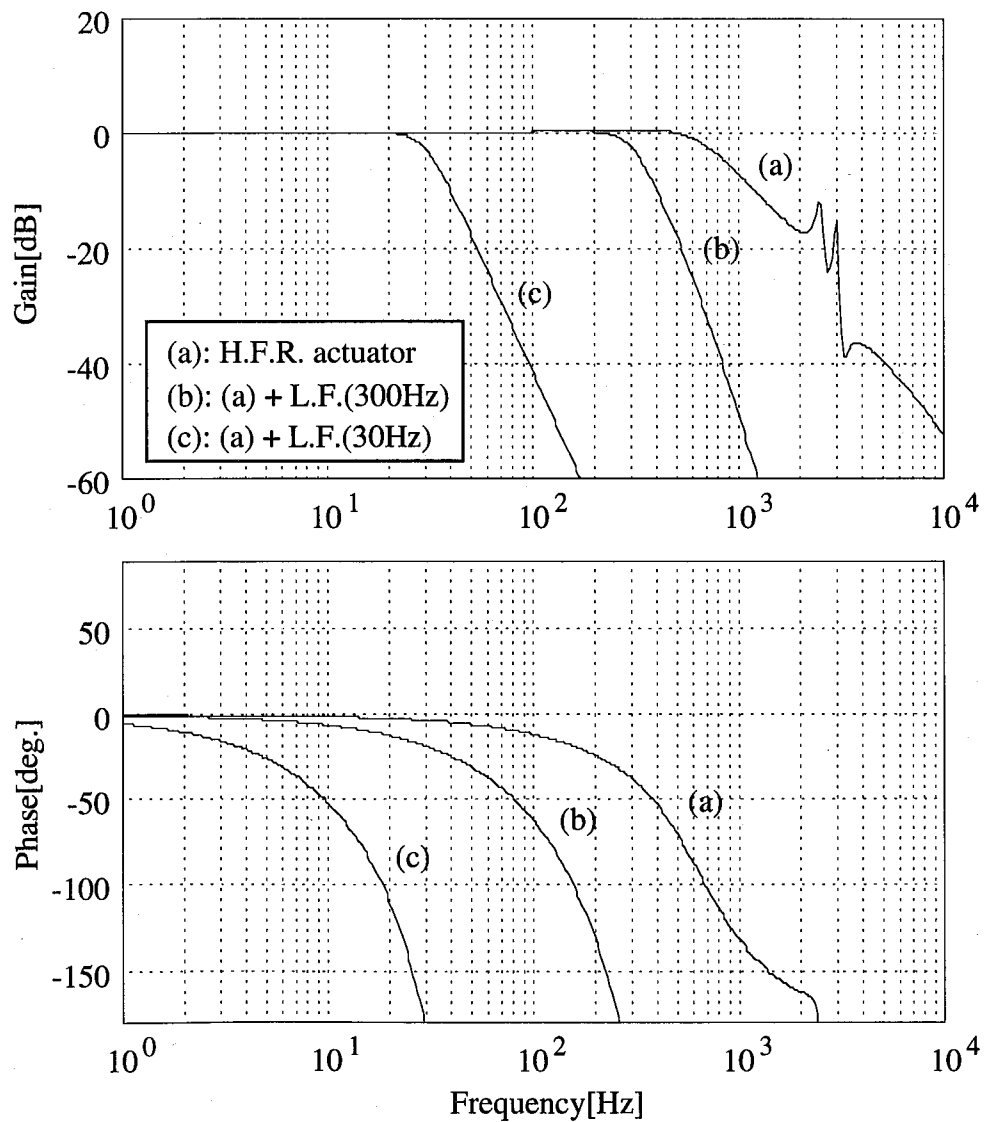


Fig. 3.3 Bode diagram of position loop.

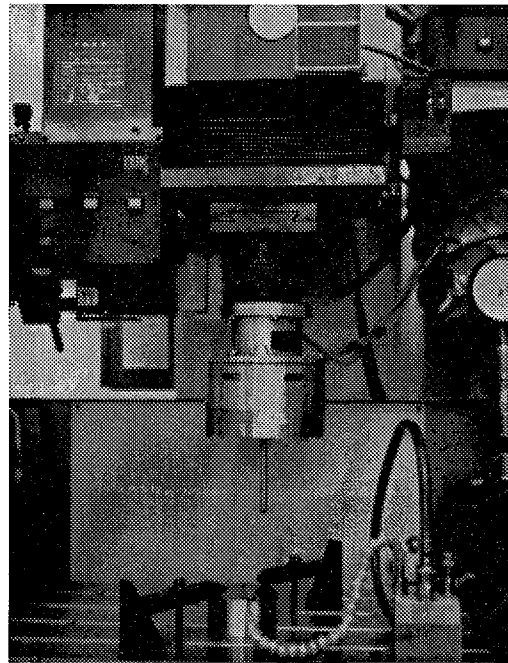


Photo 3.1 H.F.R. actuator attached to conventional EDM machine.

3.3 高速電極駆動装置による放電加工

従来のZ軸に高速電極駆動装置を付加し、電極駆動系の応答周波数がどのように加工速度改善に寄与するかを検証する。ここでは、一般に安定な放電加工状態を維持することが難しい仕上げ加工を対象とし、ジャンプ加工と噴出加工とでの有効性を示す。また微細穴加工における加工速度の改善結果についても示す。Table 3.2 は、ここで使用したそれぞれの加工条件である。仕上げ加工(1)は面粗さが約 $10\ \mu\text{mR}_{\text{max}}$ の加工、仕上げ加工(2)は面粗さが約 $1\ \mu\text{mR}_{\text{max}}$ の加工で亜鏡面加工に相当する。

Table 3.2 Machining parameters.

	finish machining(1)	finish machining(2)	micro-hole machining*
pulse settings	$v_o=230(\text{V})$, $i_p=3.5(\text{A})$ $t_{on}=16(\mu\text{s})$, $t_{off}=16(\mu\text{s})$	$v_o=300(\text{V})$, $i_p=2.5(\text{A})$ $t_{on}=1.0(\mu\text{s})$, $t_{off}=3.6(\mu\text{s})$	$v_o=150(\text{V})$ $C=2200(\text{pF})$, $R=428(\Omega)$
electrode	Cu (+)	Cu (-)	AgW (+)
workpiece	SK-3 (-)	SK-3 (+)	SUS306 (-)
jump motion settings**	$j_u=800(\mu\text{m})$ $j_d=500(\text{ms})$	$j_u=800(\mu\text{m})$ $j_d=500(\text{ms})$	—

*: RC-circuit is used, **: no jump motion during fluid flushing

3.3.1 ジャンプ加工

ジャンプ加工において電極駆動系の応答周波数を 30Hz と 300Hz にした場合の加工状態の安定性を比べる。電極は $\phi 10\text{mm}$ を使用し Table 3.2 の仕上げ加工 (1) および仕上げ加工 (2) の条件で加工を行う。Fig. 3.4 はそれぞれの条件における極間平均電圧波形の一例である。電圧波形の状況から判断して、応答周波数が 30Hz の場合、加工開始から 200ms ぐらいまで不安定な加工状態になっているが、300Hz の場合には加工開始から明らかに安定な加工状態になっている。それぞれの加工条件で 2 時間加工を行った結果を Fig. 3.5 に示す。それぞれの加工速度は、ジャンプ動作で電極が上昇している時間も含めて求めたものである。図の 30Hz と 300Hz の場合を比較すると、電極消耗率にはほとんど差がないが、平均加工速度は 300Hz の方が仕上げ加工 (1) で数 %、仕上げ加工 (2) では約 50% 速くなっている。

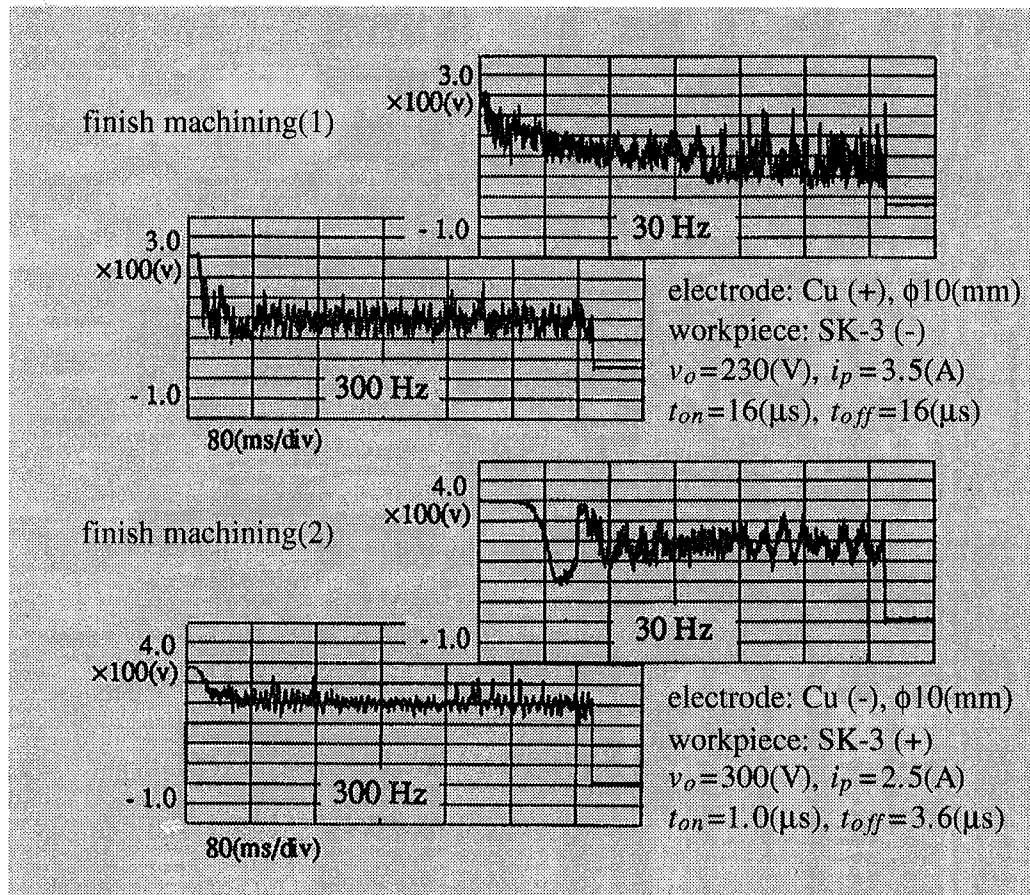


Fig. 3.4 Waveforms of average gap voltages in machining using jump motion.

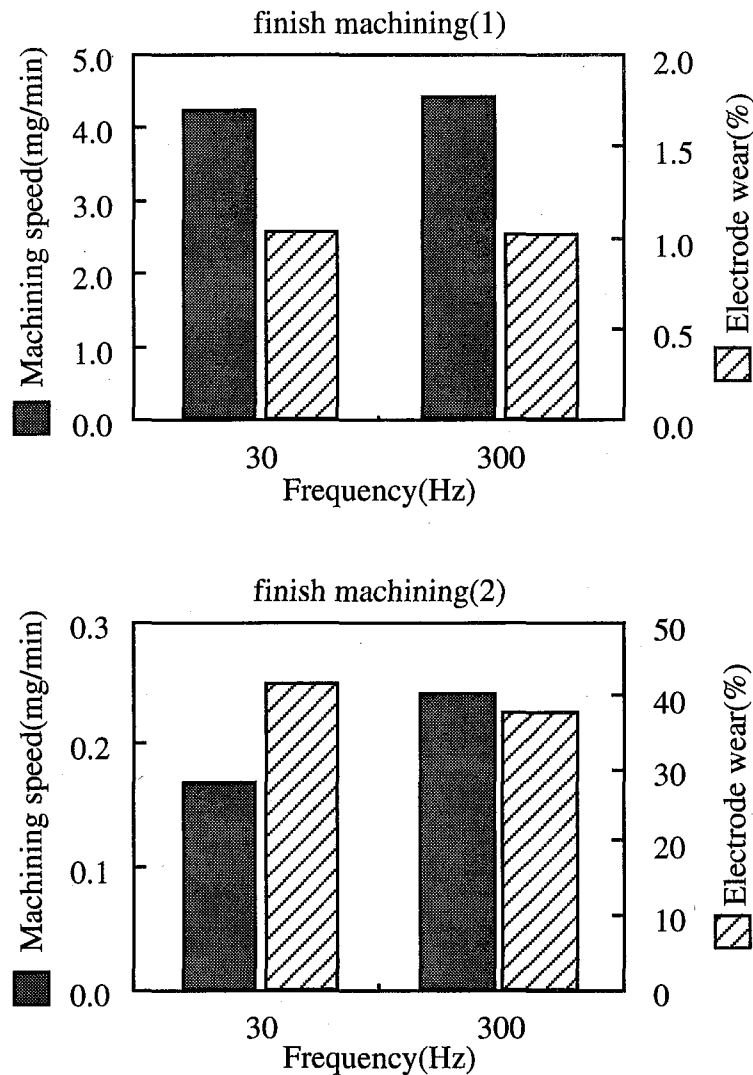


Fig. 3.5 Machining speed and electrode wear with respect to frequency response in machining using jump motion.

3.3.2 噴出加工

噴出加工において噴出液圧と電極駆動系の応答周波数を変化させ加工状態を調べる。電極は $\phi 10\text{mm}$ を使用し、 $\phi 5\text{mm}$ の穴をワークに設けワーク側からの噴出加工を行なう。電気条件はジャンプ加工時の仕上げ加工(1)の条件と同じである。Fig. 3.6は噴出液圧が 9.8kPa で電極駆動系の応答周波数を 30Hz と 300Hz にした場合に観測される典型的な極間平均電圧波形である。応答周波数が 30Hz の場合には、極間の短絡、オープン状態が頻繁に現われ、ジャンプ加工の時よりも加工状態がかなり不安定である。一方、応答周波数が 300Hz の場合には安定な加工状態が維持されている。Fig. 3.7は噴出液圧が 9.8kPa 、 19.6kPa における電極駆動系の応答周波数と平均加工速度および電極消耗率の関係を示している。図より噴出液圧が高いほうが加工は不安定になり易

いものの、電極駆動系の応答周波数が高ければ安定に加工できることがわかる。300Hzの場合の加工速度は、30Hzの場合のそれと比べて約2倍になっている。また電極消耗率は電極駆動系の応答周波数にあまり影響を受けないと推測できる。

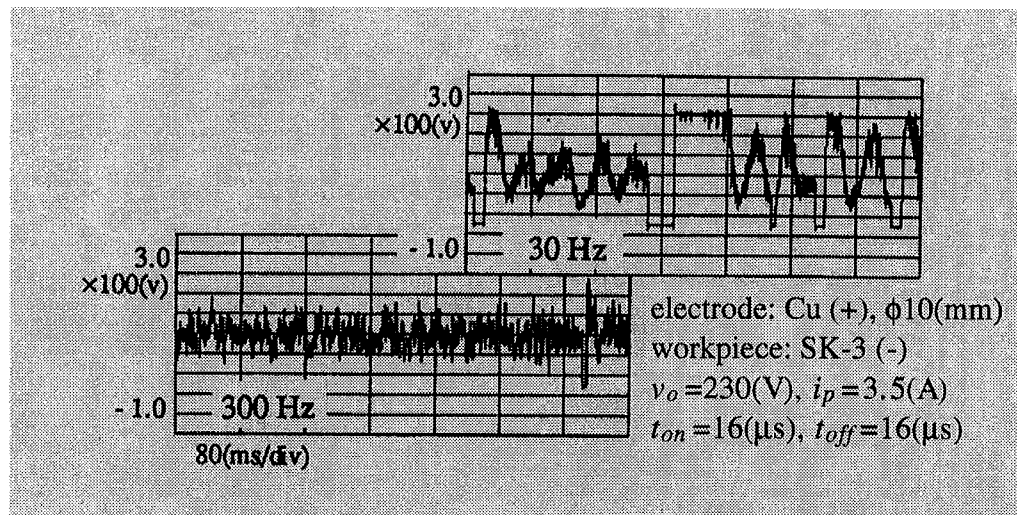


Fig. 3.6 Waveforms of average gap voltages in machining using fluid flushing.

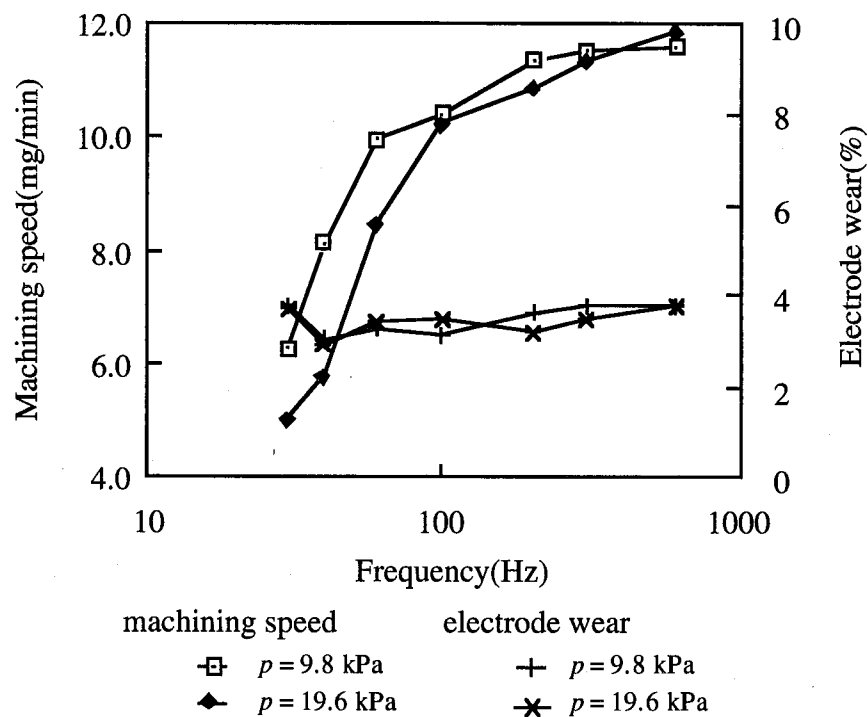
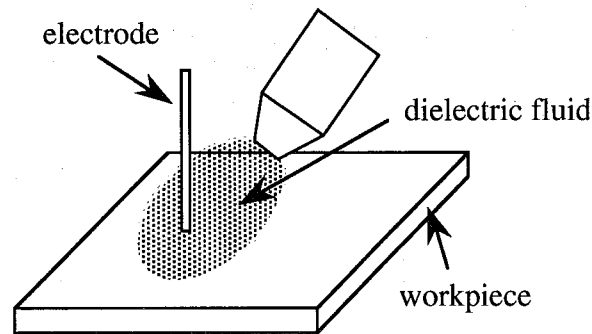


Fig. 3.7 Machining speed and electrode wear with respect to frequency response in machining using fluid flushing.

3.3.3 微細穴加工

Fig. 3.8 に示す微細穴加工において電極駆動系の応答周波数と加工特性の関係を調べる．電極は $\phi 0.24\text{mm}$ を使用し，板厚 0.7mm のワークに吹きかけ加工を利用して貫通穴加工を行なう．この加工では Table 3.2 に示す微細穴加工の条件でコンデンサ放電を使用する．

Fig. 3.9 に加工結果を示す．ここでは，加工速度を評価する量として微細穴が貫通するのに要する時間を，そして電極消耗は長さ消耗を測定している．貫通時間は電極駆動系の応答周波数を高くするにつれてだんだんと短くなり， 100Hz と 800Hz の場合を比較すると加工速度として約 2.5 倍速くなっている．一方，電極消耗はほとんど変わらないようである．



electrode: AgW (+), $\phi 0.24\text{mm}$
 workpiece: SUS306 (-), 0.7mm thick
 RC circuit: $v_o=150(\text{V})$, $C=2200(\text{pF})$, $R=428(\Omega)$

Fig. 3.8 Schematic of micro-hole machining.

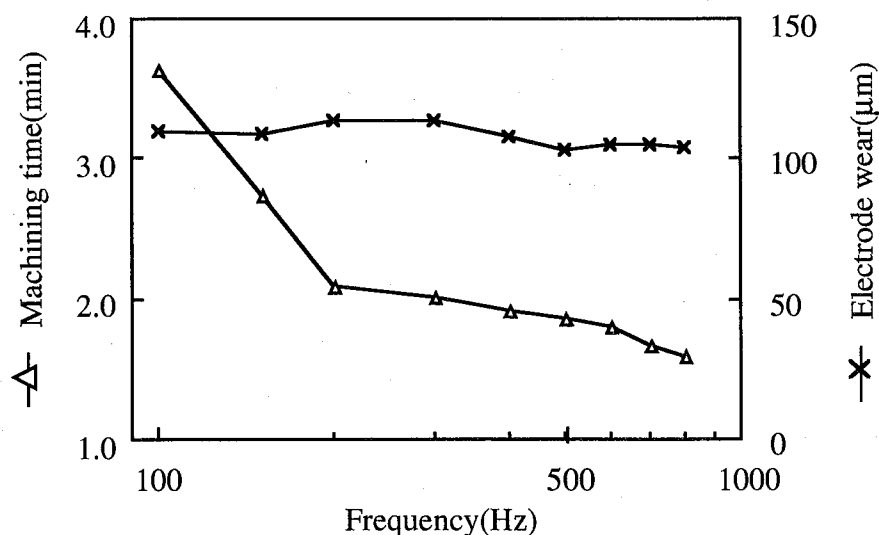


Fig. 3.9 Machining time and electrode wear with respect to frequency response in machining of micro-hole.

3.4 加工くずの挙動と加工速度改善の因果関係

高速電極駆動系による放電加工状態の安定化においては、加工条件によってその有効性が異なる。これは加工くずの挙動にもとづいてそれぞれ以下のように解釈できる。

3.4.1 ジャンプ加工

仕上げ加工 (1) や仕上げ加工 (2) では、加工の進行に伴う加工面の変化よりも加工間隙に存在する加工くず量の変動がおもに極間制御系への外乱として作用する。ジャンプ加工毎の加工間隙に存在する加工くず量は、ジャンプ動作により取り残された加工くずに加えて加工中に生成されるものと気泡などを介して排出されるものにより変動するが、その変動の極間制御系への影響は加工間隙が狭いほうが相対的に大きくなる。したがって、従来の極間制御系では、仕上げ加工 (1) に比べて加工間隙が狭い仕上げ加工 (2) において安定な加工状態を維持するのがより難しい。特にジャンプ加工では、ジャンプ動作後の加工開始時における、適度な加工くずがまだ加工間隙に存在していないような状態が問題となる。それは、Fig. 3.4 に示した応答周波数が 30Hz の場合の加工開始直後と約 200ms 経過後の極間平均電圧波形を見ると推察できる。

Fig. 3.10 は仕上げ加工 (1) におけるジャンプ加工中の高速電極駆動装置により制御された電極の動きを示している。電極位置は、高速電極駆動装置のストロークに限界があるためジャンプ動作と加工開始から数十 ms の間では従来の Z 軸と高速電極駆動

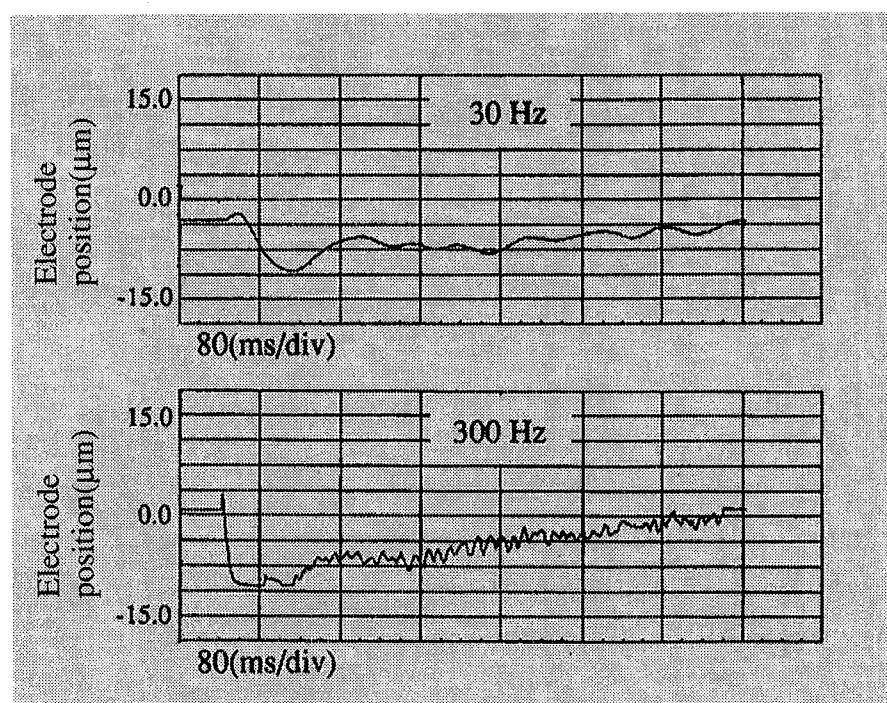


Fig. 3.10 Electrode position driven by H.F.R. actuator in machining using jump motion.

装置とが協調して制御されるが、その後は高速電極駆動装置だけで制御される。したがって観測された電極位置の変化は、加工開始から数十msの間を除いて極間距離の変化に対応している。図において電極が上方へ移動していく速さとその移動量を見ると、300Hzのほうが30Hzの場合より約2倍速くて移動量が大きいのことがわかる。

以上のことより、ジャンプ加工での極間制御系の応答特性の違いによる加工状態の相違を加工くずの挙動にもとづいて模式的に説明したのがFig. 3.11(a)である。すなわち、高速応答が可能な電極駆動系を用いて極間制御系を構成することにより、加工くず量の変動を高速に補償しながら効率よく加工くずを生成することで見かけ上の加工間隙を広げることができ、極間制御系への加工くず量変動の影響を相対的に小さくし、制御性能を改善できると考えられる。

3.4.2 噴出加工

噴出加工では、排出される加工くず量は噴出液圧によって決まり、加工間隙に存在する加工くず量は生成される加工くず量と排出される加工くず量の差となる。いま、短絡状態が発生した場合を考える。極間制御系は、短絡を回避するために電極を上方に制御するが、再び安定な加工状態を取り戻すまでの間に加工間隙に存在していた加工くずが加工液により排出される。安定な加工状態を取り戻すのに要する時間は、極間制御系の応答が遅いほど長い。すなわち、Fig. 3.11(b)に示すように極間制御系を構成する電極駆動系の応答周波数が低いほど間隙に存在する加工くず量は変動しやすく、かつ定常的に存在する加工くず量は少なくなり、安定な加工状態を維持するのが困難となり加工速度の低下を招くと考えられる。

このような加工くずの挙動に着目することで、前述の同じ仕上げ加工(1)の条件でも、ジャンプ加工時よりも噴出加工時に電極駆動系的高速応答が加工状態の安定化に大きく寄与する理由について考察することが可能である。すなわち、ジャンプ加工の例では、Fig. 3.4よりジャンプ動作後の加工開始時における加工間隙に存在する加工くず量が少ない状態に対しては電極駆動系的高速応答が加工状態の安定化に必要なではあるが、その後の加工間隙における加工くずの生成と気泡などを介しての加工くずの排出に起因する加工くず量変動に対しては、高速応答の電極駆動系でなくともかなり補償できると考えられる。一方、噴出加工の例では、加工間隙に存在する加工くずが加工液により常に強制的に排出されることから、ジャンプ加工時に比べて加工間隙が狭く、さらには例えば短絡状態の回避時に加工くずの生成量と排出量のバランスが大きく崩れ、加工間隙に存在する加工くず量が大幅に減少してしまう場合がある。このような場合には、高速応答が可能な電極駆動系により速やかに短絡状態を回避することで加工間隙からの大量の加工くずの排出を押さえ、そして加工間隙での加工くずの変動を高速に補償しながら効率よく加工くずを生成することが可能となり、加工状態の安定化を図ることができる。

3.4.3 微細穴加工

微細穴加工では、加工面積が非常に小さく、また加工間隙も狭いことから、加工間隙における加工くず量の変動は加工状態を大きく変化させる。ジャンプ加工における仕上げ加工 (2) と同じように高速応答が可能な極間制御系によりその変動を高速に補償することで加工速度改善が実現されている。

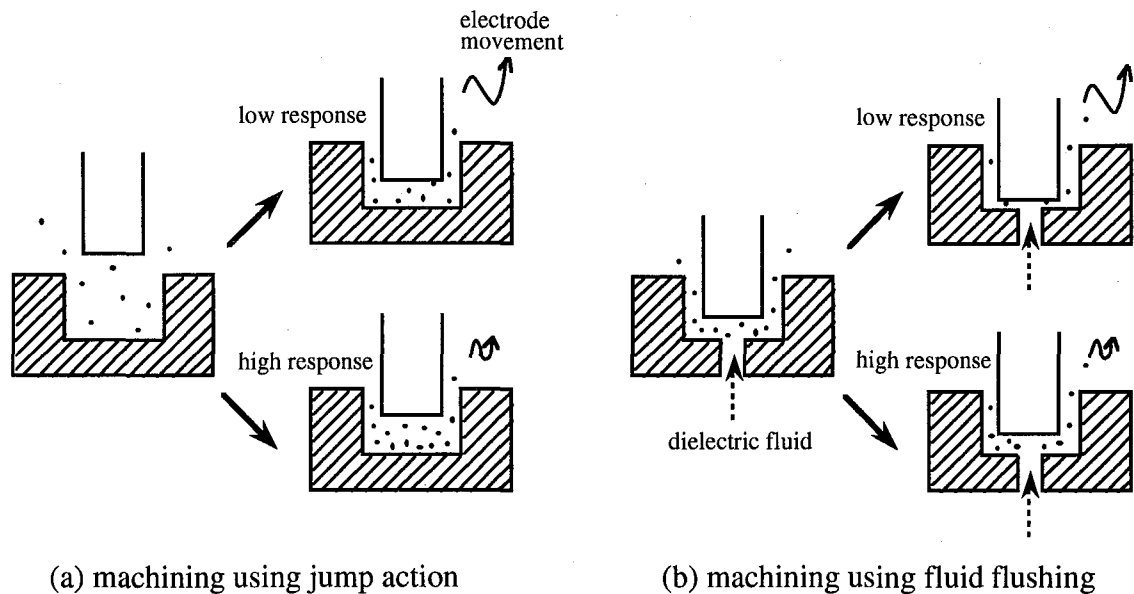


Fig. 3.11 Behavior of debris in different machining conditions.

3.5 おわりに

本章では、圧電素子を用いた高速電極駆動装置を製作し、その高速応答がどのように加工状態を安定化し加工速度改善に寄与するかについて実験を行なった。その結果、高速電極駆動装置により極間制御系を構成した場合、応答周波数が数十Hzである通常の電極駆動装置の場合に比べて、仕上げ加工 (2) の条件でのジャンプ加工や仕上げ加工 (1) の条件での噴出加工、さらに微細穴加工において約 1.5 ~ 2.5 倍の加工速度の改善ができることを示した。そして、加工くずの挙動にもとづいて電極駆動系の応答特性が加工状態の安定化と加工速度改善にどのように作用するかについて定性的に説明し、放電加工の加工速度を改善するうえで高速電極駆動装置が有効であることを明らかにした。

第4章 適応型フィードフォワード 制御によるCO₂レーザ加工速度改善

4.1 はじめに

近年、CO₂レーザ加工機は穴あけや切断などの板金加工だけでなく溶接、表面処理、シート材の高速切断などの分野にも利用されつつあり、生産性向上のためにレーザ加工機の加工速度や加工品質の改善がますます強く求められている。このような要求を実現するためには、レーザ発振器の高性能化、加工機本体の位置決め速度・精度の改善、そして加工プロセス制御の適応性能向上などが不可欠となる。ここでは、特にレーザ発振器の高性能化を図るために、レーザ出力の安定化やレーザ出力応答の改善について取り上げる。

従来、レーザ加工機においては、レーザ出力、加工パルスのデューティファクタ、繰返し周波数などの加工条件と、その加工条件に基いたレーザ発振器への操作量との関係をあらかじめ実測し、その関係をテーブルに持つことでレーザ出力のフィードフォワード制御系を構成することが考えられた[48]。この制御系では、数百 μ s以下の高速なレーザ出力応答が可能であるが、ガス劣化によりレーザ発振器の特性が変化する場合、レーザ出力に誤差が生じる。そのため、新しいガスを常に供給する方法が取られたが、ランニングコストが高くなるという問題が生じた。

これらに対して、パワーセンサによりレーザ出力を検出し、フィードバックすることでガス劣化やガス温度変化などが発生してもレーザ出力に定常誤差を生じないフィードバック制御系が提案された[49], [50], [51], [52]。この方法では、新しいガスを常に供給しなくても安定なレーザ出力を得ることができ、ランニングコストを大幅に低減できる。しかしながら、応答速度が数百ms程度のサーミスタ型やサーモパイル型のパワーセンサが用いられるため、レーザ出力応答はそのパワーセンサの応答速度により制限され、遅れやオーバーシュートを伴う場合がある。

ところでレーザ加工では、NC制御により加工テーブル（あるいは加工ヘッド）を移動[53]させ所望の形状を加工する。良好な加工を実現するためには、被加工物の加工点におけるレーザエネルギーがある許容範囲となるようにレーザ出力と加工テーブル移動速度を選ぶ必要がある。したがって、たとえば加工条件切り替え時においてレーザ出力に遅れを伴う場合には、レーザ出力が設定値となるまで加工テーブル移動を起動しないように、レーザ出力応答特性を考慮した待ち時間を設ける必要があり、加工品質や加工速度を改善するうえで障害となる。

本章では、上記のような問題点を解決するために、従来のレーザ発振器のフィードバック制御系に適応型フィードフォワード制御を付加したレーザ出力制御系を提案する[54], [55]。第4.2節では、ここで提案するレーザ出力制御系の概要について説明する。そして、第4.3節では、ガスが受け取る放電エネルギーを考慮したレーザ発振器のモデル化手法と、適応型フィードフォワード制御に必要なとされるレーザ発振器の逆システムの構成およびその逆システムの適応修正方法について述べる。この構成によれば、比較的簡単にフィードフォワード量を求められるだけでなく、ガス劣化やガス温度変化などに伴うレーザ発振器の特性変動に対しての修正を容易に行うことができる。さらに、第4.4節では、ここで提案した制御系の有効性をシミュレーションにより明らかにし、第4.5節では、実機における制御性能、および実加工における加工品質、加工速度を改善した結果を示す。

4.2 適応型フィードフォワード制御

レーザ出力制御系における適応型フィードフォワード+フィードバック制御系の構成例を **Fig. 4.1** に示す。図において、 w_r は平均レーザ出力、 d は加工パルスのデューティファクタ、 f は加工パルスの繰返し周波数の設定値である。また、 i_{FB} はフィードバック制御器の出力信号、 i_{FF} はフィードフォワード制御器の出力信号、 $i_p (=i_{FB} + i_{FF})$ はピーク電流設定値、 i は加工パルス条件 d, f に基いてピーク電流設定値 i_p をパルス化して作られる操作量、 w_p はレーザ発振器の出力を表す。

この制御系では設定された所望の平均レーザ出力を得るためにピーク電流設定値が調節される。したがって、フィードフォワード制御器にはピーク電流から平均レーザ出力までのレーザ発振器特性の逆システムを構成する。この時、パワーセンサと同じ特性を補償器に構成し[56]、逆システムを実際のレーザ発振器の逆特性と一致させられるならば、伝達特性は1となり高速応答が実現できる。しかしながら、レーザ発振器の特性は、ガス劣化、ガス温度変化、ガス流の脈動、光学系のアラインメント状態の変化、光学系の劣化などにより変動する。ここでは、レーザ加工機の使用上、特に問題となるガス劣化およびガス温度変化に対応して逆システムを適応的に修正し、常に高速なレーザ出力応答を実現する。

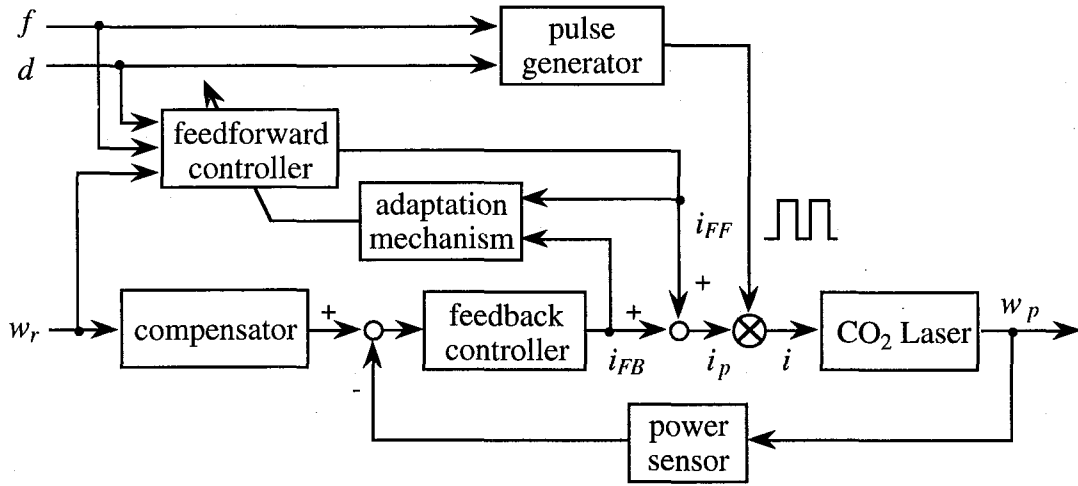


Fig. 4.1 Adaptive feedforward + feedback control system for CO₂ laser.

4.3 レーザ発振器のモデリングと逆システムの構成

4.3.1 レーザ発振器の入出力特性

フィードフォワード制御を行うためにはレーザ発振器の逆システムが必要であるが、初めにレーザ発振器のモデル化手法について検討する。

本研究で使用したレーザ発振器の概略構成を Fig. 4.2 に示す。発振器は横励起型でガス封じ切りであり、ガス成分は CO₂:CO:N₂:He=8:4:60:28、ガス圧は 7.46kPa である。

いま、入力を電流 i 、出力をレーザ出力 w_p とすると、レーザ発振器の入出力特性は (4.1) 式で近似できる。(4.1) 式において、 K_p はレーザ発振器の動作点により変化する非線形ゲイン、 T_p はガス励起用電源の時定数、 W_{osp} はレーザを発振する共振器の特性とレーザ発振器の動作点から決まるオフセット、 s はラプラス演算子である。ここで時定数 T_p は数百 μs 以下である。

$$w_p = \frac{K_p}{1+T_p s} i + W_{osp} \quad (4.1)$$

したがって、レーザ出力応答速度への要求仕様を約 10 ms とするならば、ピーク電流 i_p から平均レーザ出力 w_m (レーザ出力 w_p の平均) までの特性は、(4.2) 式に示す静的なシステムと見なすことができる。ここで、 K_m は非線形ゲイン、 W_{osm} はオフセットである。

$$w_m = K_m i_p + W_{osm} \quad (4.2)$$

Fig. 4.3 は加工パルスのデューティファクタと繰返し周波数が異なる場合に実測されたレーザ発振器の入出力特性、すなわち $i_p^*(=i_p/\text{rated } i_p)-w_m$ 特性の一例である。 $i_p^*-w_m$ 特性はデューティファクタや繰返し周波数により大きく異なる。また、Fig. 4.3 にはガ

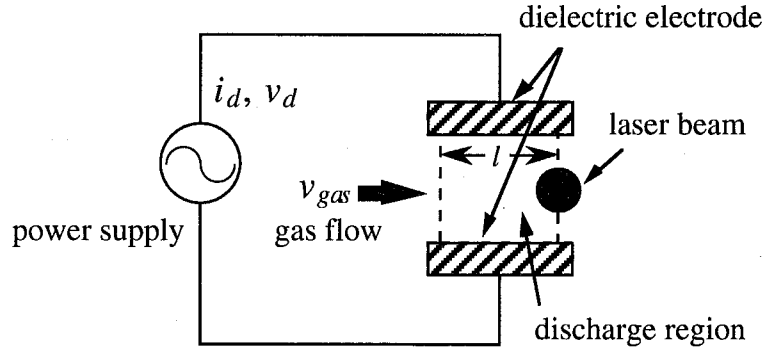


Fig. 4.2 Schematic illustration of a transverse-flow laser.

ス劣化が生じた場合の $i_p^*-w_m$ 特性も合わせて示す．ここでのガス劣化とは，新しいガスの状態 (state1) から 10 時間加工後のガスの状態 (state2) を意味する．図よりガス劣化が生じると全体的にレーザ出力が低下し，その低下はデューティファクタが小さく，繰返し周波数が高い場合に著しい．

以上より (4.2) 式の非線形ゲイン K_m およびオフセット w_{osm} は，設定される加工条件 (i_p, d, f) やガス劣化状態 (S_{gas}) などに応じて変動することがわかる．そこで，レーザ発振器の入出力特性を (4.2) 式から (4.3) 式のような関数として記述することを試みる．

$$w_m = F(i_p, d, f, S_{gas}) \quad (4.3)$$

ここでは，関数 F が簡単な構造となるように，ガスが受ける放電エネルギーに着目したモデル化を考える．Fig. 4.4 は Fig. 4.2 に示したレーザ発振器におけるレーザ出力，励起電力，放電電流の関係を模式的に示したものである．すなわち，(4.4a) 式で記述するように，実際のレーザ出力 w_p に関与する有効電力 w_e は，ガス流が放電空間を通過する間に受け取るエネルギーより決まる励起電力 w_d からレーザ発振のしきい値電力 w_o を差し引いたものである．また，平均レーザ出力 w_m と平均有効電力（有効電力 w_e の平均） w_{em} との間には (4.4b) 式の関係が成り立つ．ただし η は発振効率である．

$$w_p = \eta w_e = \eta (w_d - w_o) \quad (4.4a)$$

$$w_m = \eta w_{em} \quad (4.4b)$$

いま，放電励起時の放電電流を i_d ，放電電圧を v_d とし，放電電圧 v_d は一定 ($v_d=1$) と見なすと，励起電力 w_d は放電電流 i_d をガス流が放電空間を通過する時間 Δt だけ積分して得られるエネルギー e より決定できる．また，レーザ発振のしきい値電力 w_o は CW(Continuous Wave) 発振でのレーザ出力がゼロとなる放電電流（以下，しきい値電流 i_{po} と呼ぶ）に対応する．以上より，有効電力 w_e は次式のように求められる．

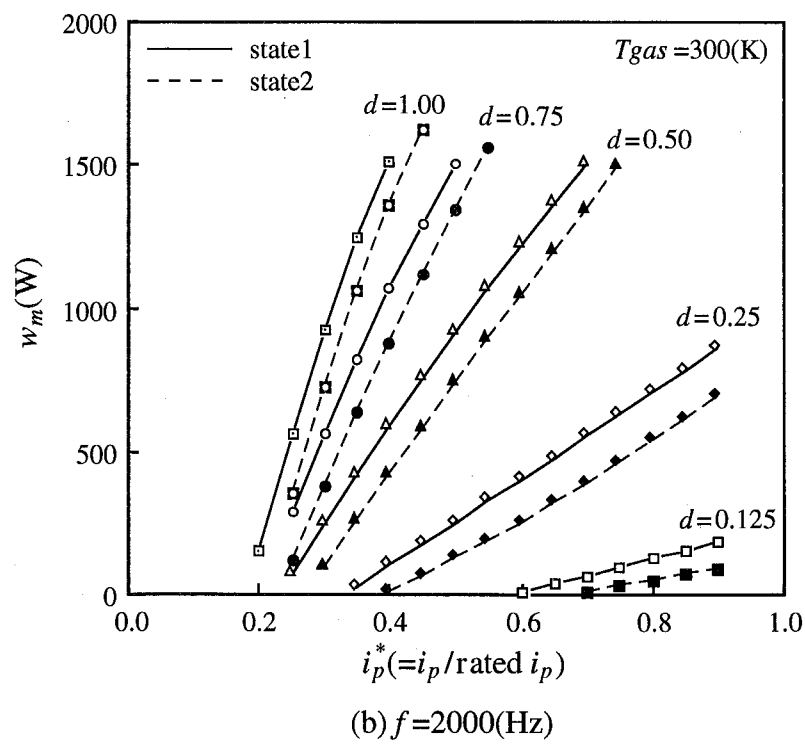
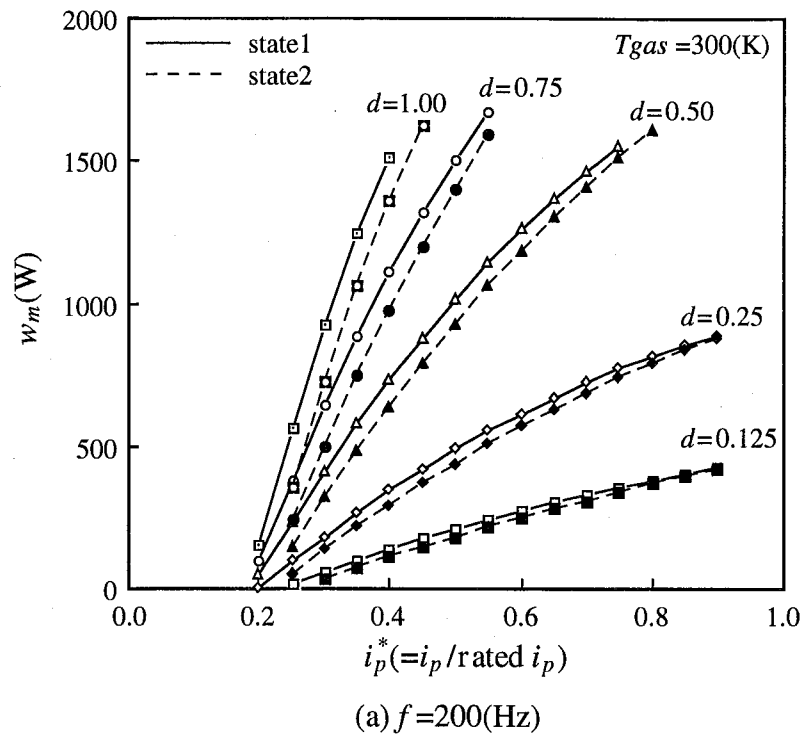


Fig. 4.3 Characteristics of w_m vs i_p^* .

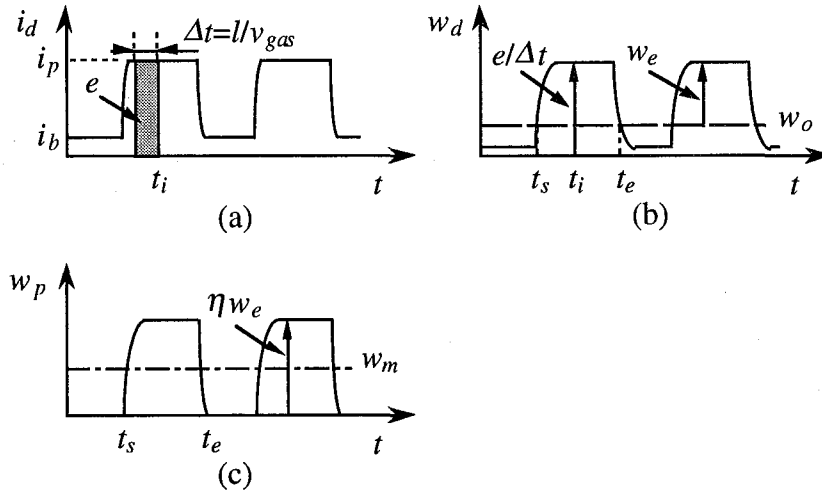


Fig. 4.4 Relationships among (a)discharge current, (b)discharge power and (c)laser output power.

$$w_e(t) = \frac{1}{\Delta t} \left(\int_{t-\Delta t}^t i_d(\tau) d\tau - i_{po} \Delta t \right) \quad (w_e(t) > 0) \quad (4.5a)$$

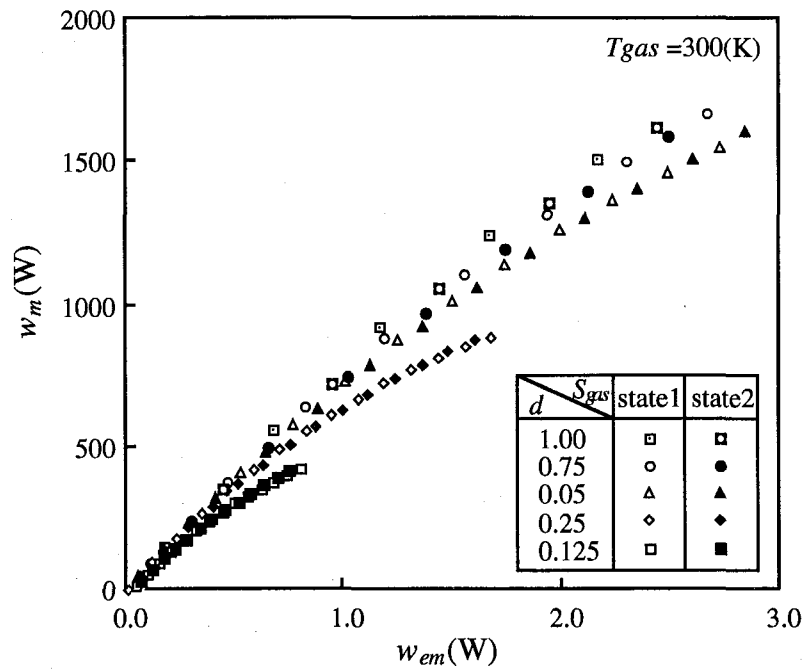
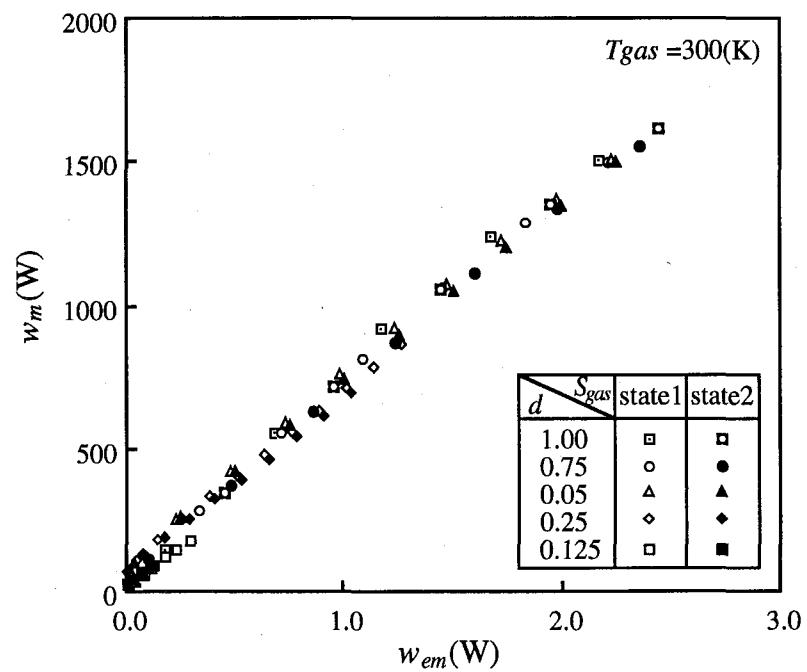
$$= 0 \quad (w_e(t) \leq 0) \quad (4.5b)$$

そこで、まず Fig. 4.2 の測定条件に対応して (4.5a) および (4.5b) 式を用いて求めた平均有効電力 w_{em} と平均レーザ出力 w_m との関係、すなわち w_{em} - w_m 特性を **Fig. 4.5** に示す。Fig. 4.5 では、電源の一次遅れ要素の時定数を 200 μ s、ガス流が放電空間を通過する時間を $\Delta t = 160\mu$ s とした。 w_{em} - w_m 特性は、任意のデューティファクタ、繰返し周波数に対して原点を通る曲線となり、同じデューティファクタ、繰返し周波数においてはガスが劣化した場合にも一つの特性曲線となる。このことは、平均有効電力を考えることでガス劣化が生じた場合にもレーザ発振器の入出力特性を統一的に扱うことができることを示している。また、しきい値電流 i_{po} はガス状態を反映した量であり、ガス劣化に対応してモデル修正のパラメータとして有効であることを示唆している。

次に、(4.6) 式を用いて w_{em} - w_m 特性曲線の傾き補正を行い、任意のデューティファクタ、繰返し周波数における w_{em} - w_m 特性を CW 発振の w_{em} - w_m 特性で記述することを試みる。

$$w'_{em} = \phi(d, f) w_{em} \quad (4.6)$$

(4.6) 式の $\phi(d, f)$ は、デューティファクタと繰返し周波数により変化する傾き補正係数である。**Fig. 4.6** に Fig. 4.5(a), (b) を補正して得られた w'_{em} - w_m 特性を示す。

(a) $f=200(Hz)$ (b) $f=2000(Hz)$ **Fig. 4.5** Characteristics of w_m vs w_{em} .

以上よりレーザ発振器の入出力特性は、デューティファクタ d 、繰返し周波数 f 、ピーク電流 i_p が設定され、ガス劣化状態を表すレーザ発振のしきい値電流 i_{po} が与えられれば、(4.5a), (4.5b), (4.6) 式および Fig. 4.6 によりモデル化できる。なお、具体例は省略するが、ガス温度変化 [57] に対してもガス劣化と同様に扱うことができる。

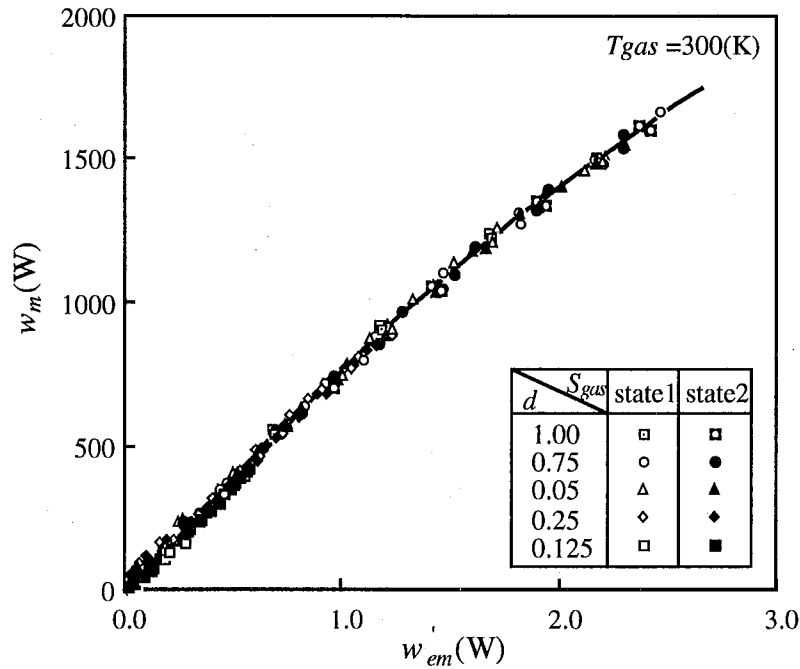


Fig. 4.6 Characteristics of w_m vs w'_{em} .

4.3.2 逆システムの構成

前節で求めたレーザ発振器のモデルからフィードフォワード制御に必要なレーザ発振器の逆システムを構成する。すなわち (4.3) 式に対して次式を求める。

$$i_p = F^{-1}(w_m, d, f, S_{gas}) \quad (4.7)$$

まず, Fig. 4.6 の w_{em} - w_m 特性と $\phi(d, f)$ の傾き補正係数のデータを **Table 4.1** と **Table 4.2** のようにそれぞれ準備しておく。平均レーザ出力 w_m , デューティファクタ d , 繰返し周波数 f が設定されると, w_{em} は **Table 4.1** から, ϕ は **Table 4.2** から直線補間により求められる。

次に, w_{em} としきい値電流 i_{po} から (4.5a), (4.5b) 式を利用してピーク電流値 i_p を求めればよいが, この逆演算は解析的には困難である。**Fig. 4.7** は, **Fig. 4.3** に対し, (4.5a), (4.5b) 式を利用してピーク電流 i_p と平均有効電力 w_{em} との関係, すなわち i_p - w_{em} 特性をプロットしたものである。もし, この i_p - w_{em} 特性を直線で近似できるならば, 上述の逆演算を容易に実現することが可能である。そこで, 以下の式により直線近似を行う。

$$w_{em} = ai_p + b, \quad a = d, \quad b = \phi(d, f, i_{po}) \quad (4.8)$$

Fig. 4.7 には (4.8) 式の直線を同時に示すが, 非常によい近似となっている。したがって, あるガス劣化状態でのしきい値電流 i_{po} が既知ならば, 直線補間により **Table 4.3** からその時の $\phi(d, f, i_{po})$ を求め, 以下のように逆演算が実現できる。

$$i_p = \frac{w_{em} - \phi(d, f, i_{po})}{d} \quad (4.9)$$

以上よりレーザ発振器の逆システムは, 平均レーザ出力 w_m , デューティファクタ d , 繰返し周波数 f が設定され, しきい値電流 i_{po} が与えられれば, **Table 4.1**, **Table 4.2**, **Table 4.3**, および (4.9) 式により構成できる。なお, この逆システムにより, 実際に使用される加工条件の範囲において $\pm 10\%$ 以下の誤差でフィードフォワード量を得ることができることを確認している。(付録 B を参照)

Table 4.1 $w'_{em} - w_m$ at CW.

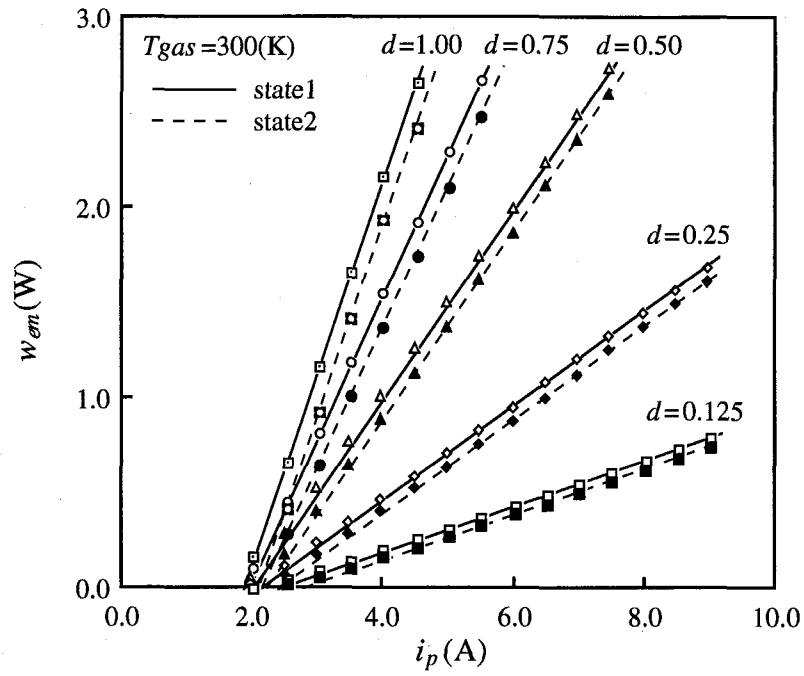
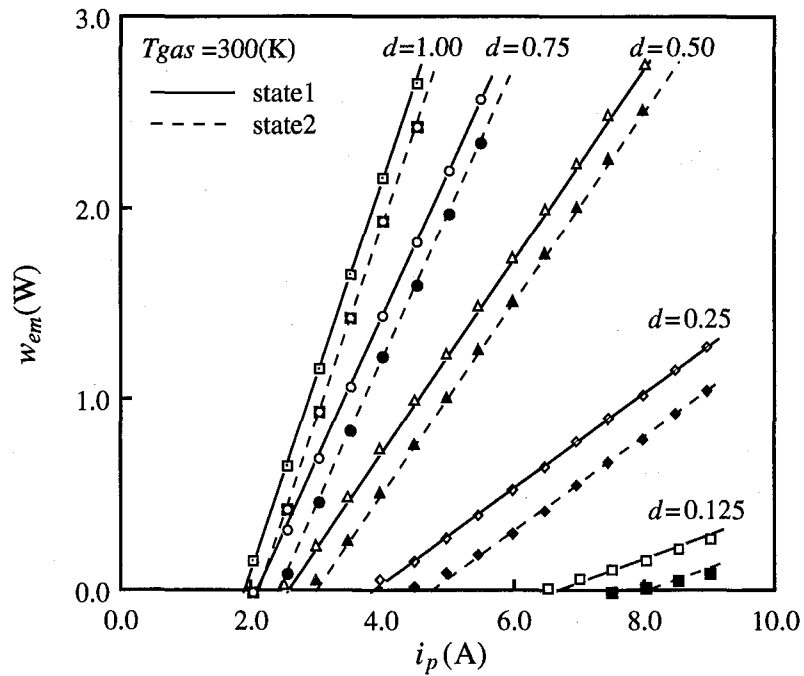
$w'_{em}(W)$	$w_m(W)$
0.0114	10
0.2258	200
0.5825	500
1.2397	1000
2.1861	1600

Table 4.2 $\phi(d, f)$.

$d \backslash f_{(Hz)}$	500	1500	2500
1.000	1.000	1.000	1.000
0.750	0.966	0.996	0.968
0.500	0.915	0.905	0.943
0.250	0.807	0.741	0.808
0.125	0.734	—	—

Table 4.3 $\phi(d, f, i_{po})$.

d	0.75		...	0.125	
$f_{(Hz)} \backslash i_{po}(A)$	1.832 (state1)	2.280 (state2)		1.832 (state1)	2.280 (state2)
0	-1.832	-2.280		-1.832	-2.280
50	-1.383	-1.722		-0.259	-0.325
200	-1.409	-1.758		-0.352	-0.452
500	-1.461	-1.830		-0.532	-0.706
1500	-1.517	-1.963		-0.730	-1.169
2500	-1.527	-1.975		-0.765	-1.211

(a) $f=200(\text{Hz})$ (b) $f=2000(\text{Hz})$ **Fig. 4.7** Straight line approximation of characteristics of w_{em} vs i_p .

4.3.3 逆システムの適応修正則

レーザ発振器の特性はガス劣化やガス温度変化により変動するが、常に良好なレーザ出力応答を得るためには、それらの変動に対して逆システムを適応修正する必要がある。これまでも逆システムの適応修正に関連して、制御対象の構造は既知として未知なパラメータだけを同定しながら逆システムを構成するアダプティブフィードフォワード制御系 [58], [59] や、ニューラルネットを用いたフィードフォワード制御器に対してフィードバック誤差学習により逆システムを獲得する制御系 [60], [61] などが提案されている。

レーザ発振器の出力制御系では、通常、平均レーザ出力の設定値 w_r はステップ入力となる。そこで、フィードバック誤差学習を参考にし、ステップ応答時のフィードバック制御器の出力信号の定常値がゼロとなるように逆システムのしきい値電流を適応修正する。適応動作は、レーザ発振器の逆システムが静的なシステムとみなせ、しかも平均レーザ出力の設定値 w_r および適応動作に伴うフィードフォワード制御器の出力信号 i_{FF} のステップ状変化に対してフィードバック制御器の出力信号 i_{FB} が定常値に達しているとみなせるサンプリング周期で行う。

このとき、 k 回目の適応修正時のフィードバック制御器の出力信号の定常値を $i_{FB}(k)$ 、フィードフォワード制御器の出力信号を $i_{FF}(k)$ 、しきい値電流を $i_{po}(k)$ とすると適応修正則は次式で与えられる。

$$i_{po}(k+1) = i_{po}(k) + \gamma d i_{FB}(k) i_{FF}(k) \quad (4.10a)$$

$$0 < \gamma < \frac{2}{\alpha i_{FF}(k)} \quad (4.10b)$$

ここで γ は適応ゲイン、 d は加工パルスのデューティファクタ、 α は Table 4.3 に示す $\varphi(d, f, i_{po})$ の変動幅から決まる定数である。適応動作の安定性については付録 C にまとめる。

4.4 シミュレーション

適応型フィードフォワード制御によるレーザ出力制御系の有効性を明らかにするために、レーザ出力のステップ応答をシミュレーションする。

Fig. 4.8 にはシミュレーションに用いたレーザ出力制御系の構成を示す。ここでは、パワーセンサの特性 $G_s(s)$ はあらかじめ精度よくモデル化できるとする。それぞれの動特性は以下のとおりである。なお、CW 発振でのレーザ発振器のゲイン K_p およびオフセット W_{osp} は、前節の Fig. 4.3 に示した $d=1.0$ の曲線より求められる K_m および W_{osm} を用いて $K_p=K_m$, $W_{osp}=W_{osm}$ とした。

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1+T_p s}, \quad T_p = 2.0 \times 10^{-4} \quad (4.1')$$

$$G_s(s) = \frac{1}{1+T_s s}, \quad T_s = 1.0 \times 10^{-1} \quad (4.11)$$

$$G_c(s) = \frac{1}{(1+T_c s)}, \quad T_c = T_s \quad (4.12)$$

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_I}{s}, \quad k_p = 4.70 \times 10^{-3}, \quad k_I = 9.55 \times 10^{-2} \quad (4.13)$$

まず、従来のフィードバック制御における CW 発振でのステップ応答の一例を **Fig. 4.9 (a)** に示す。図よりオーバーシュートや応答の遅れが発生し、それらの量はステップ量の違いにより変化していることがわかる。

次に、ガス劣化状態は既知であるとし、従来のフィードバック制御にフィードフォワード制御を付加した場合のステップ応答を **Fig. 4.9 (b)** に示す。Fig. 4.9 (a) と比較すると、ステップ量の大きさによらずオーバーシュート量や応答の遅れが大幅に改善され、その応答速度はほぼ一定であることがわかる。

最後に、ガス劣化への適応動作を CW 発振でのステップ応答により評価する。ここでは、レーザ発振器はガス劣化状態にあるのに対してフィードフォワード制御の逆システムはガス劣化状態にない状況、すなわち逆システムの i_{po} 値が真値より 20% ほど小さい場合のシミュレーションを行った。適応修正則は前節の (4.10) 式を用い、適応ゲインは $\gamma=0.3$ とした。また、適応動作のサンプリング周期は (4.1'), (4.11) ~ (4.13) 式の動特性を考慮して 1.0s とした。**Fig. 4.10** に適応動作時のレーザ出力 w_p 、フィードフォワードおよびフィードバック制御器の出力信号 i_{FF}^* , i_{FB}^* 、および適応パラメータであるしきい値電流 i_{po}^* の変化を点線にて示す。ここで、 i_{FF}^* , i_{FB}^* は最大許容ピーク電流値で、 i_{po}^* はその真値で正規化したものである。図より適応動作が進むに従い i_{FB}^* はゼロ、 i_{FF}^* は一定値、 i_{po}^* は真値に収束していることがわかる。

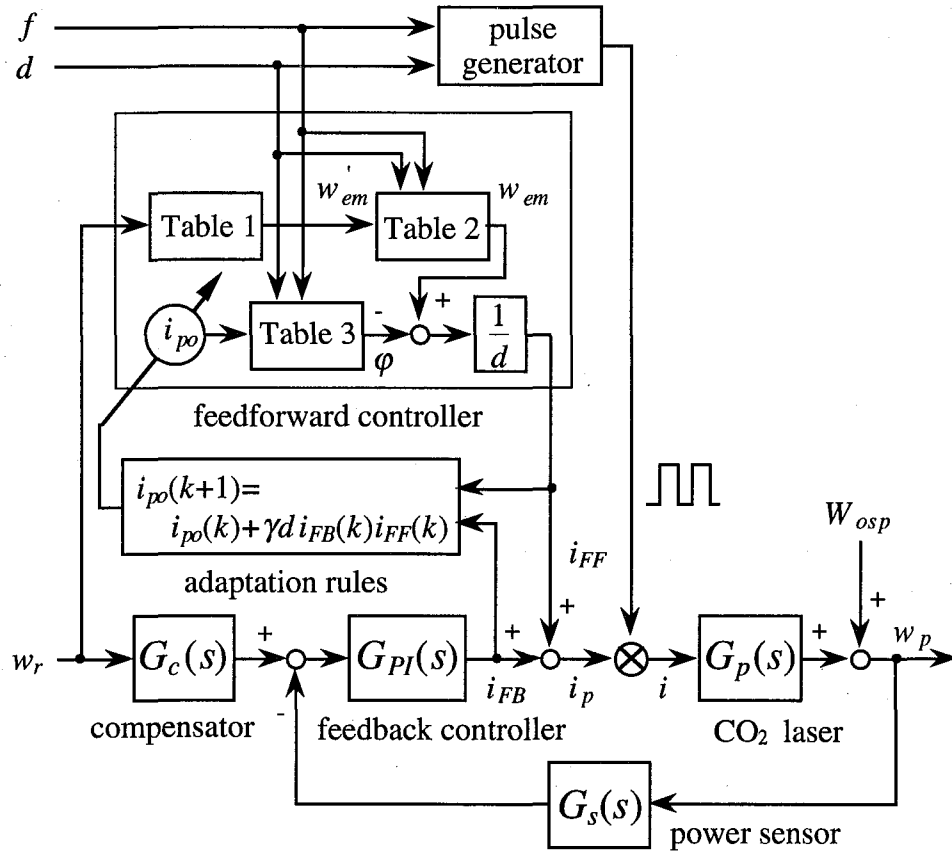


Fig. 4.8 Block diagram of proposed laser power control system for simulation.

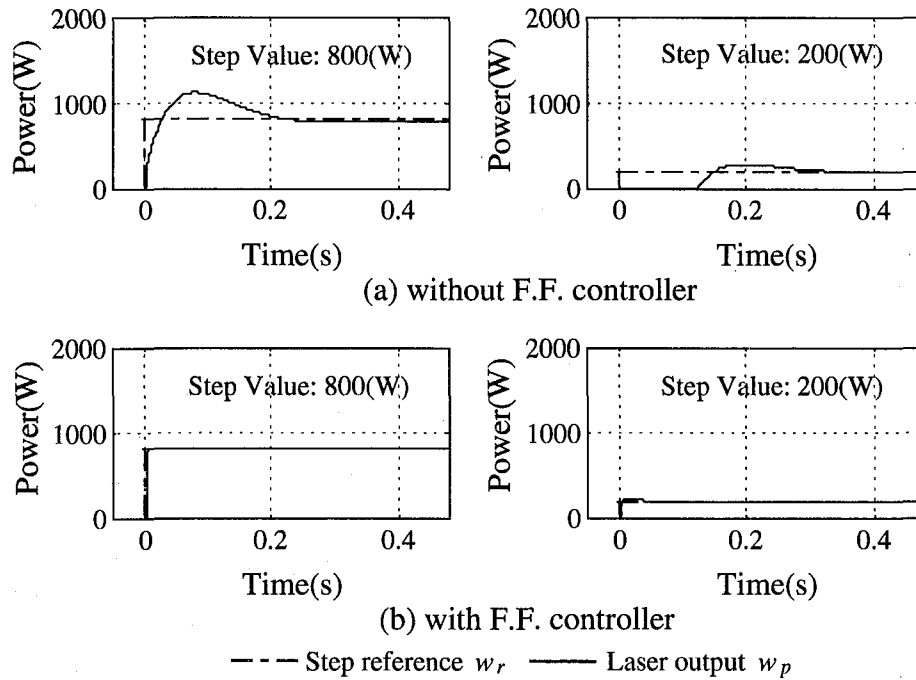


Fig. 4.9 Typical step responses with feedforward controller and that without it.

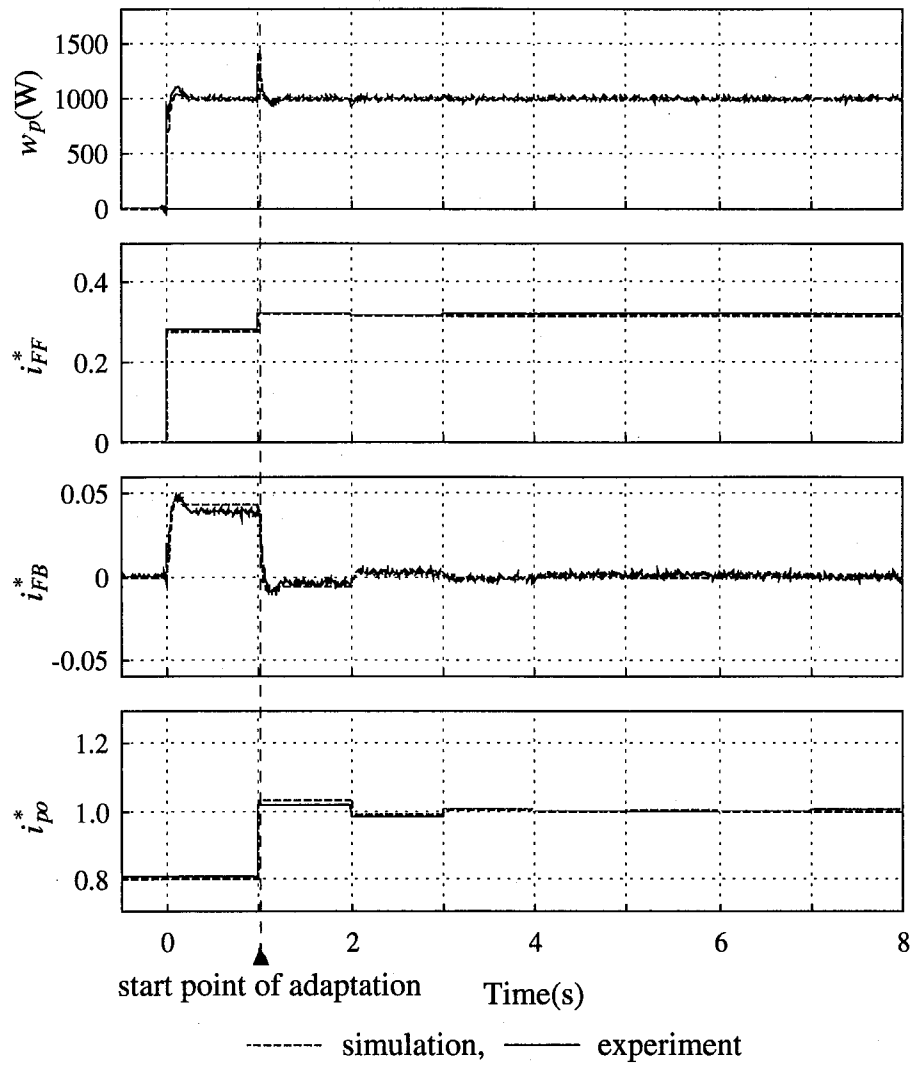


Fig. 4.10 Comparison between simulation and experimental results of adaptation to gas deterioration.

4.5 実験結果

4.5.1 実機におけるレーザ出力応答の改善

前節では提案する制御系の有効性をシミュレーションにより明らかにしたが、ここではその有効性を実機において評価する。以下、Fig. 4.8 に基づいたレーザ出力制御用コントローラを試作し、レーザ出力の計測にはHgCdTe 赤外光検出センサを利用して実験を行った。このセンサの応答速度は1ns以下であるが、取り扱い上の制約やコストの点で問題があり、一般のレーザ加工機にはほとんど使用されていない。

まず、いくつかの加工条件においてフィードフォワード量算出のための i_{po} 値が真値より20%ほどずれた場合のレーザ出力のステップ応答を実測した結果をFig. 4.11に点線にて示す。図において、CW発振ではレーザ出力 w_p を w_m として、PW発振ではレーザ出力 w_p のパルス1周期での平均値を w_m としている。それぞれの応答において、フィードフォワード量が不適切なためオーバーシュートが発生している。

次に、前述の適応動作時のシミュレーションと同じ加工条件で、実機において適応動作を行った。その時のレーザ出力 w_p 、フィードフォワードおよびフィードバック制御器の出力信号 i_{FF}^* 、 i_{FB}^* 、しきい値電流 i_{po}^* の変化をFig. 4.10に実線にて示す。それぞれの信号は、シミュレーション結果（点線）とほぼ同じ挙動を示し、安定な適応動作が実現されている。

前節で述べたように、しきい値電流はレーザ発振器への設定値（平均レーザ出力、加工パルスのデューティファクタ、加工パルスの繰返し周波数）とは独立にガス状態を把握できる。したがって、上記の加工条件で適応修正した逆システムは、他の加工条件でも有効であることが期待できる。Fig. 4.11には、適応動作後におけるそれぞれのステップ応答を実線にて示す。図より適応修正時と異なる加工条件においてもオーバーシュートのない高速応答が実現できており、このことは提案するモデル化手法が適応動作を行う上でも実用的であることを示している。

最後に、適応動作の安定性を種々の加工条件において実験的に検証する。適応動作の安定性は、フィードフォワード量算出のための i_{po} 値を真値から故意にずらしておき、レーザ出力のステップ入力を与えた時のフィードフォワードおよびフィードバック制御器の出力信号 i_{FF}^* 、 i_{FB}^* 、しきい値電流 i_{po}^* の収束性により評価した。ここで、適応ゲインや適応動作のサンプリング周期は前述のシミュレーションの場合と同じである。

Fig. 4.12 (a)にはレーザ出力の設定値、 i_{po} 値の真値からのずれ量が異なる場合の適応動作への影響を示す。レーザ出力の設定値はCW発振において500W, 1000W, i_{po} 値の真値からのずれは±10%, ±20%とした。図において、 n は適応修正回数を表しており、 $n=0$ はステップ入力を与えられた時点に相当する。また、それぞれの信号値は、適応動作のサンプリング時点での値を表している。いずれの場合においても適応動作が進むに従い、 i_{FF}^* はレーザ出力に対応した一定値、 i_{FB}^* はゼロ、 i_{po}^* は真値に収束していることがわかる。

Fig. 4.12 (b)には加工パルスの繰返し周波数の設定値が異なる場合の適応動作への影響を示す。繰返し周波数の設定値は200Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, レーザ出力の

設定値は 500W, 加工パルスのデューティファクタの設定値は 0.50, i_{po} 値の真値からのずれは $\pm 10\%$ とした. いずれの場合にも安定な適応動作が実現されている.

Fig. 4.12 (c) には加工パルスのデューティファクタの設定値が異なる場合の適応動作への影響を示す. デューティファクタの設定値は 0.25, 0.50, 0.75, レーザ出力の設定値は 500W, 繰返し周波数の設定値は 500Hz, i_{po} 値の真値からのずれは $\pm 20\%$ とした. 小さいデューティファクタにおいてやや収束性が悪化するものの, いずれの場合においても安定な適応動作が実現されている.

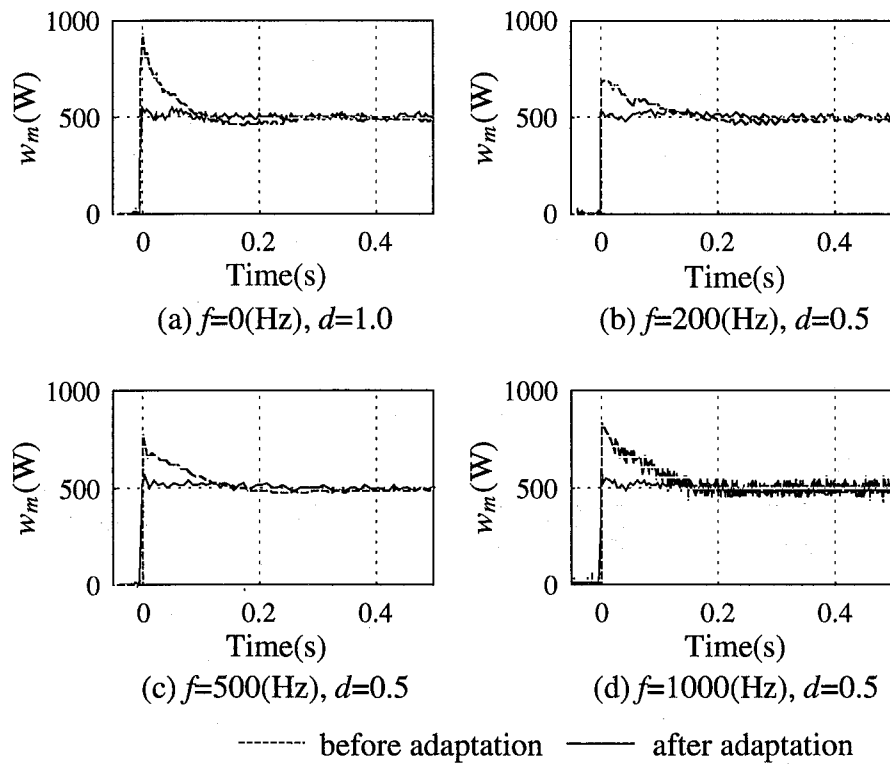


Fig. 4.11 Typical step responses before and after adaptation.

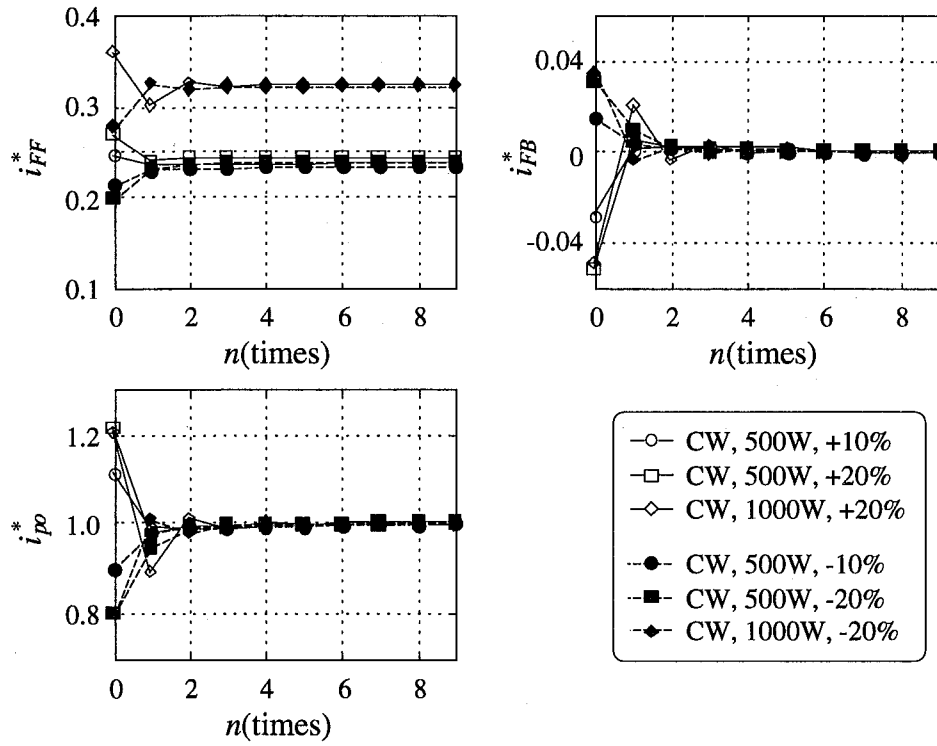


Fig. 4.12(a) Adaptation behavior for different reference power with incorrect i_{po} .

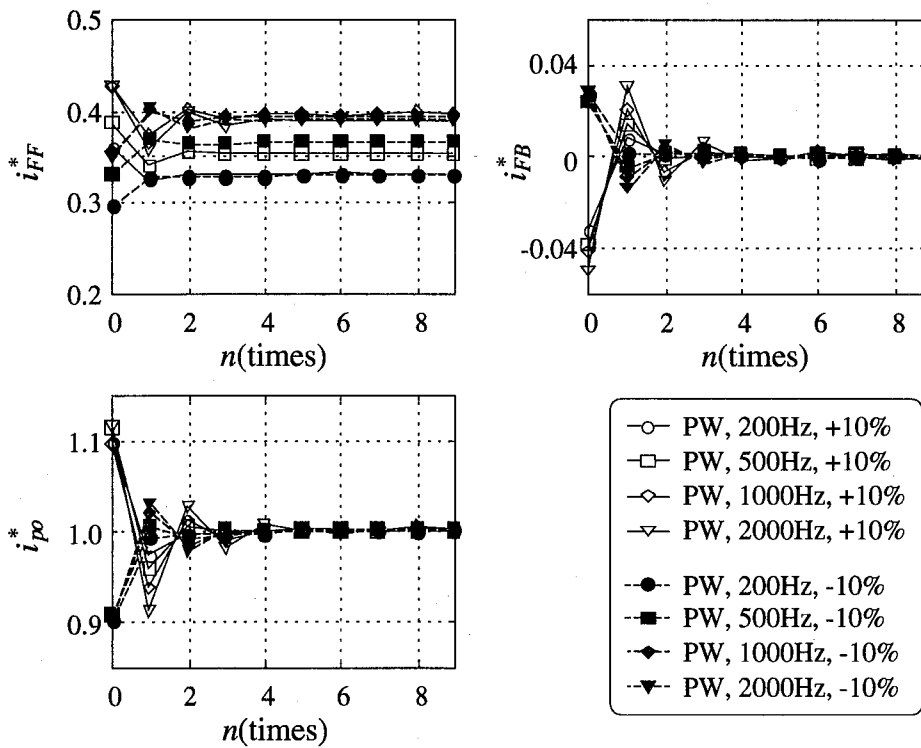


Fig. 4.12(b) Adaptation behavior for different pulse frequency with incorrect i_{po} .

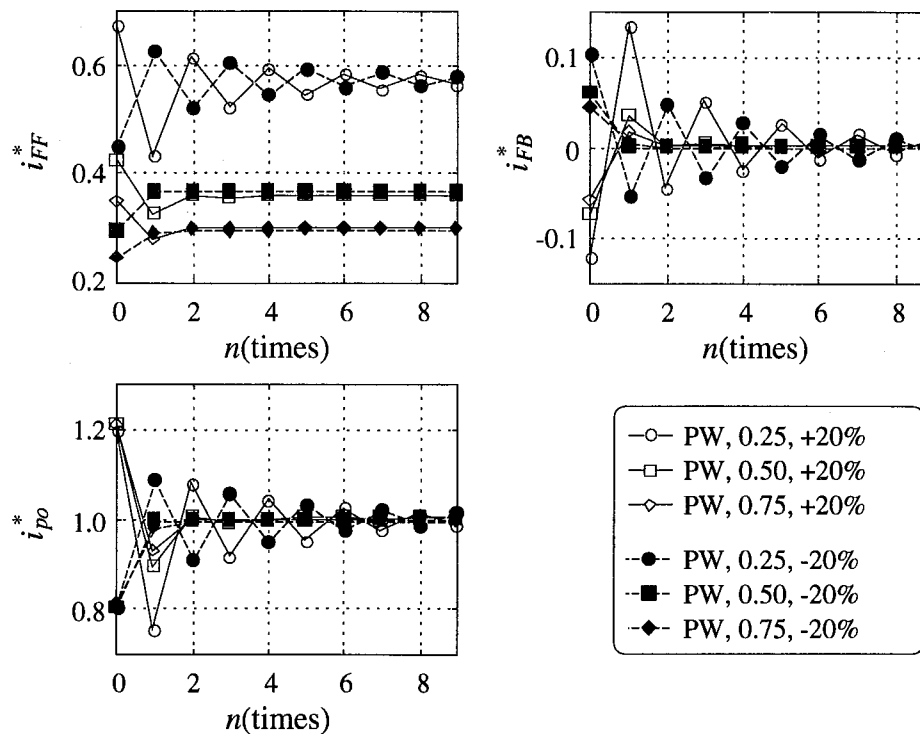


Fig. 4.12(c) Adaptation behavior for different pulse duty with incorrect i_{po} .

4.5.2 実加工における加工速度の改善

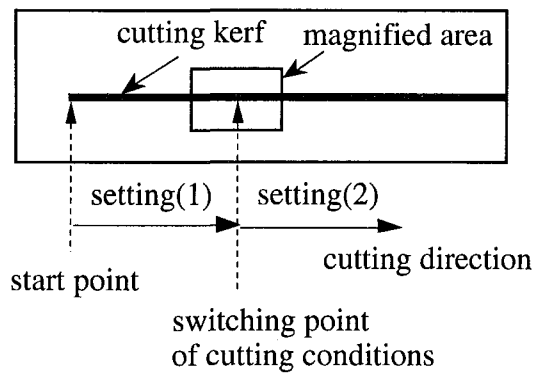
従来のレーザ出力制御系による切断加工では、前述したように加工条件切り替え時に待ち時間（ドウェルタイム）を設ける必要があった。そこで、適応型フィードフォワード制御を用いたレーザ出力制御系により実際の加工において加工速度の改善を試みる。以下の加工実験は、逆システムが適応動作により実際のレーザ発振器の逆特性に一致している状況で行った。

Fig. 4.13 は従来のレーザ出力制御系、およびここで提案した制御系による薄板の直線切断の結果である。加工条件は図に示すとおりである。Fig. 4.13 (a) は従来の制御系で加工条件切り替え時に待ち時間を設けなかった場合で、大きな溶け落ちが発生している。それに対して Fig. 4.13(b) は従来の制御系で待ち時間を設けた場合で、この場合には溶け落ちが発生していない。さらに、Fig. 4.13(c) はここで提案した制御系による加工結果であり、加工条件切り替え時に待ち時間を設けなくても良好な加工を実現している。

Fig. 4.14 は薄板の穴あけ加工の結果である。加工条件は図に示すとおりであり、ここでは2分間に加工できる穴数で加工速度の評価を行った。従来のレーザ出力制御系では141個、提案した制御系では183個の穴が加工できており、約30%の加工速度改善を実現している。なお、それぞれの加工精度はほぼ同じであり、付録Dに代表的

な真円度測定結果を示す。

以上の結果は、適応型フィードフォワード制御により加工条件切り替え時のレーザ出力応答をオーバーシュートの発生なく高速にすることができ、加工品質を低下させることなく従来必要とされた待ち時間を不要にすることができたためである。

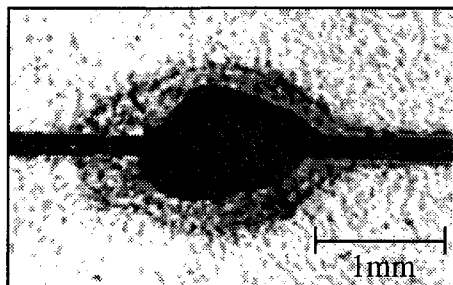


material: mild steel(JIS SPC)

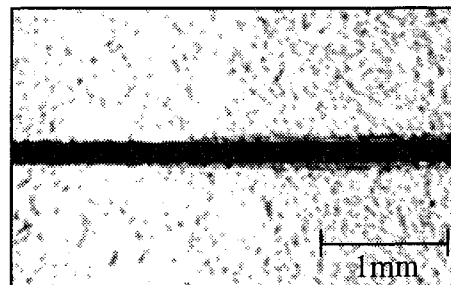
thickness: 1mm

assist gas: O₂ ($p=0.3\text{MPa}$)

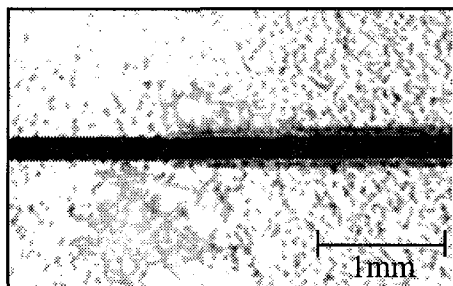
	setting(1)	setting(2)
$w_r(\text{W})$	80	165
$f(\text{Hz})$	200	500
d	0.1	0.25
$v(\text{m/min})$	0.3	1.0



(a) conventional controller
without dwell time



(b) conventional controller
with dwell time



(c) proposed controller
without dwell time

Fig. 4.13 Examples of thin plate line-cutting.

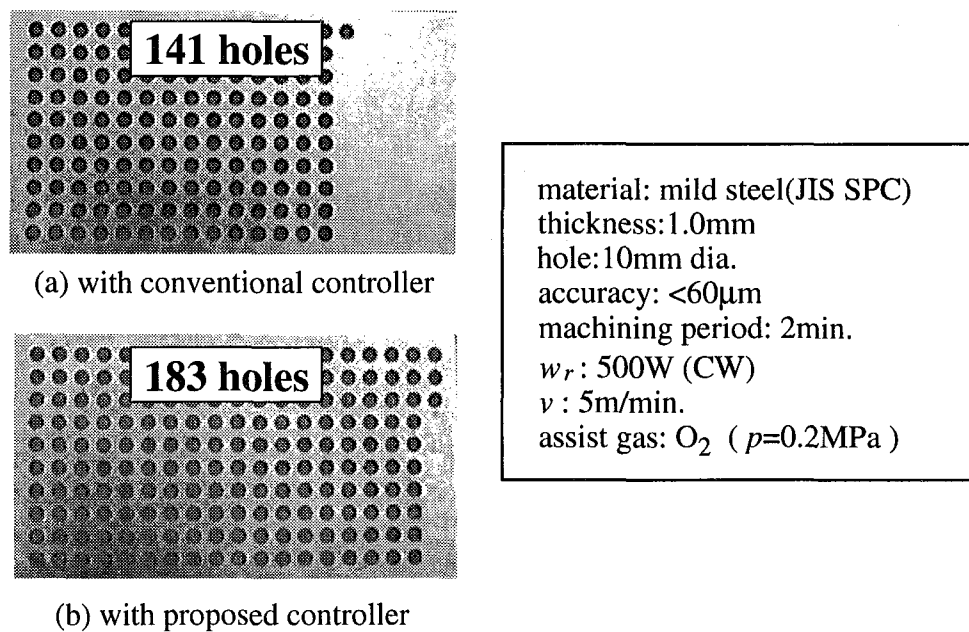


Fig. 4.14 Examples of thin plate hole-cutting.

4.6 おわりに

本章では、レーザ発振器のレーザ出力応答の高速化を実現するために、従来のフィードバック制御に適応型フィードフォワード制御を付加したレーザ出力制御系を提案した。そして、フィードフォワード制御に必要なレーザ発振器の逆システムを構成するために、ガスが受ける放電エネルギーに着目し、レーザ発振における有効電力としきい値電力を考慮したモデル化手法を検討した。その手法により構成した逆システムは、比較的簡単にフィードフォワード量を求められるだけでなく、ガス劣化などに伴うレーザ出力特性の変動に対しても容易に適応修正が可能であり、実用的であることを示した。また、ここで提案した制御系によりレーザ出力応答を従来の数百 ms からオーバーシュートなく 10ms 以下に高速化できることをシミュレーションおよび実機において確認した。さらに、薄板切断の実加工では、従来必要とされていた加工条件切り替え時の待ち時間をなくしても従来の加工品質を維持できることを明らかにし、穴あけ加工では加工速度を約 30% 向上できることを示した。

第5章 結 論

5.1 本論文の結論

本論文では、「放電加工およびレーザ加工を対象とし、新しい加工制御技術により加工の高速・高精度化を実現する」ことを目的に、緒論で示した加工制御系における以下の3つの課題の解決に取り組んだ。

[課題1]

大面積放電加工における加工機変形による加工精度悪化の改善

[課題2]

放電加工における電極駆動系の応答性と加工速度の関係を明確化し、仕上げ加工領域での加工速度の改善

[課題3]

レーザ加工におけるオーバーシュートや時間遅れを伴うレーザ出力応答による加工速度低下の改善

[課題1]の問題を解決するために第2章では、外乱オブザーバを用いて、加工反力および機械変形を推定し、機械変形量の推定値により加工指令値を補償することを提案した。提案した加工制御系により、従来、数百 μm の加工誤差が発生し熟練作業による追加工が必要であった大面積放電加工において、加工誤差を数 μm 以下に抑えることを可能とし熟練作業による追加工を不要にすることができた。その結果、従来に比べて約40%の加工時間短縮をも実現することができた。この外乱オブザーバを構成する場合の機械系のモデル化および加工反力の外乱としての扱いは、大面積放電加工に限定した必要最小限な加工プロセスモデルを提供している。また、外乱オブザーバは機械変形量や加工反力を推定することができる。それは、従来の極間電圧検出に加えて新たな放電加工状態の検出手段を実現している。したがって、機械変形量の推定に加えて加工反力を推定することで、機械変形を許容範囲内に抑えた上で加工時間を短縮できる新しいジャンプ動作制御系の展開も考えられる。

[課題2]の問題を解決するために第3章では、ピエゾ素子を用いた高速電極駆動

装置を製作し、その高速応答がどのように加工状態を安定化し加工速度改善に寄与するかについて実験を行なった。その結果、高速電極駆動装置により極間制御系を構成した場合、応答周波数が数十Hzである通常の電極駆動装置の場合に比べて、仕上げ加工条件でのジャンプ加工や噴出加工、さらに微細穴加工において約1.5～2.5倍の加工速度の改善が実現できた。そして、加工くずの挙動にもとづいて電極駆動系の応答特性が加工状態の安定化と加工速度改善にどのように作用するかについて定性的に説明し、放電加工の加工速度を改善するうえで高速電極駆動装置が有効であることを明らかにした。この高速電極駆動装置を、仮に一般の形彫り放電加工機に展開しようとするならば、扱える電極重量制限が問題であると思われるかもしれない。しかしながら、微細穴加工などの領域では加工電極は軽量なため、現状のままで十分実用化できる。また、ここで明らかになった加工状態の安定化と電極駆動系の応答性との関係から、高速電極駆動装置に替えて、さらに応答性が期待でき、電極重量の制限がない加工パルス制御を極間制御系へ取り込めば同様の効果が期待できる。さらに、加工くずの挙動の違いは、放電加工プロセスモデルを加工くずの挙動にもとづいていくつかに分類することが有効であることを示唆している。

〔課題3〕の問題を解決するために第4章では、従来のフィードバック制御に適応型フィードフォワード制御を付加したレーザ出力制御系を提案した。ここでは、ガスが受ける放電エネルギーに着目し、レーザ発振における有効電力としきい値電力を考慮することで、フィードフォワード制御に必要なレーザ発振器の逆システムを構築した。この逆システムは、ガス劣化などに伴うレーザ出力特性の変動に対しても容易に適応修正が可能である。また、ここで提案した制御系によりレーザ出力応答を従来の数百msからオーバーシュートなく10ms以下に高速化できることをシミュレーションおよび実機において確認した。さらに、薄板切断の実加工では、従来必要とされていた加工条件切り替え時の待ち時間をなくしても従来の加工品質を維持できることを明らかにし、穴あけ加工では加工速度を約30%向上できることを示した。なお、ここでのレーザ発振器のモデル化手法は、実機での演算量なども考慮して作られた非常に合理的なものである。

5.2 今後の課題

最後に、形彫り放電加工機およびCO₂レーザ加工機の加工制御系に関する今後の課題についてまとめる。

・放電加工の学習型統合化制御系の実現

放電加工の加工制御に関しては、本研究も含めて放電加工状態の検出方法、加工適応制御など、非常に数多くの研究がなされている。そして、それらの多くは限られた加工領域においては、加工精度・加工速度の改善に非常に有効である。

しかしながら、放電加工機を利用する作業者にとって、その加工制御が適応領域をはずれたことによる加工性能低下は受け入れがたい。また、いくつかある加工制御のなかから最適なものを自分で選択することは困難である。そこで、個別領域で有効な加工制御を加工の状況に応じて自動的に選択、変更できる統合化制御系の構成を考える。そこでは、あらかじめ定式化できない要素が存在し、また定量的に表現できるとは限らない。そこで、学習過程や定性推論の仕組みなどを従来の制御系と融合させ、より自律性を持つ加工制御系を実現することで加工性能向上を目指す。

・レーザ加工の適応制御系の実現

レーザ加工においては、放電加工に比べて加工のフィードバック制御がほとんど行われていない。これは、前述したように加工プロセスの状態を検出する実用的なセンサがないことによる。しかしながら、ユーザからのレーザ加工機の高性能化に対する要求はますます強くなっている。まずは、加工分野を限定し、そこでの実用的なセンサおよび信号処理技術を確立することが重要であると考えられる。そして、加工のフィードバック制御を実現することで大幅な加工性能向上を目指す。

参考文献

- [1] 山中, 上原: 新版機械加工, 朝倉書店, (1997)
- [2] 竹山: 難削材の加工技術, 工業調査会, (1972)
- [3] 斉藤: 放電加工のしくみと 100%活用法, 技術評論社, (1979)
- [4] 宮崎, 宮沢, 村川, 吉岡: レーザ加工技術, 産業図書, (1991)
- [5] F.Van Dijck: Physico-Mathematical Analysis of the Electro Discharge Machining Process, Ph.D thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 73 D2
- [6] F.Van Dijck, J.R.Crookall, C.J.Heuvelman and R.Snoeys: Some Results of Physical Research in EDM, Proc. of the ISEM-4, pp.68/75 (1974)
- [7] C.J.Heuvelman: Some Aspects of the Research on Electro-Erosion Machining, Annals of the CIRP, Vol.17, pp.195/199 (1969)
- [8] 黒川: 放電加工の伝達関数, 電気学会雑誌, Vol.80, No.860, pp.571/578 (1960)
- [9] K.P.Rajurkar and S.M.Pandit: Adaptive Control of EDM-technology and Reseach, Society of Manufacturing Engineers, MR83-202, pp.1/13 (1983)
- [10] S.M.Pandit and W.H.Witting: A Data Dependent Systems Approach to Optimal Microcomputer Control Illustrated by EDM, Journal of Engineering for Industry, Vol.106, pp.137/142 (1984)
- [11] 今井, 森田, 丸山: 放電加工における最小分散制御の検討, 第 26 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.441/442 (1987)

- [12] M.Weich, W.Konig and H.Peuler : Automatic Control and Supervision of the EDM-process, Proc. of the ISEM-7, pp.1/8 (1983)
- [13] S.K.Bhattacharyya and M.F.El-Menshawy : Monitoring and Controlling the E.D.M. Process, Journal of Engineering for Industry, Vol.102, pp.189/194 (1980)
- [14] C.J.Heuvelman, R.Jansen, J.Van Lierop and G.Theuws :
The Application of Micro-Computers in Controlling the Spark-Erosion Process,
Proc. of the ISEM-6, pp.103/106 (1979)
- [15] M.M.Tseng : A Systematic Approach to the Adaptive Control of the Electro-Discharge Machining Process, Journal of Engineering for Industry, Vol.100, pp.303/310 (1978)
- [16] J.P.Kurth, R.Snoeys and D.Dauw : Adaptive Control Techniques for
the Optimization of EDM, Proc. of the ISEM-6, pp.97/102 (1979)
- [17] 今井, 森田, 野田, 丸山 : 連鎖構造を持つファジィ制御器による加工状態の認識,
システムシンポジウム講演論文集, Vol.14th, pp.75/78 (1988)
- [18] A.Morita, Y.Iami, A.Noda and M.Takegaki : Fuzzy Controller with Chained Structure,
Proc. of the IFSA, pp.83/84 (1988)
- [19] 森田, 今井, 野田, 丸山, 小林 : 形彫り放電加工機のファジィ制御,
電気加工技術, Vol.13, No.41, pp.25/31 (1989)
- [20] A.Morita, Y.Imai, H.Maruyama and K.Kobayashi : Fuzzy Controller for EDM,
Proc. of the ISEM-9, pp.236/239 (1989)
- [21] R.Snoeys, D.Dauw and M.Jennes : Survey of EDM Adaptive Control and Detection Systems,
Annals of the CIRP, Vol.31, pp.483/489 (1982)
- [22] B.Van Coppenolle and D.Dauw : On the Evolution of EDM Research, Part1 Modeling
and Controlling the EDM Process, Proc. of the ISEM-11, pp.117/131 (1995)
- [23] G. Chryssolouris : Laser Machining, Theory and Practice, Springer-Verlag (1991)
- [24] B.Burg, E.Lamotte, L.Foulloy and B.Zavidovique : A Smart Laser Cutter ,
Proc. of the SPIE, Vol.650, pp.271/278 (1986)

- [25] G.Chryssolouris and P.Sheng : Process Control of Laser Grooving Using Acoustic Sensing
Proc. of ASME Winter Annual Meeting, (1990)
- [26] M.Moriyasu, S.Hiramoto, S.Hoshinouchi and M.Ohmine : Adaptive Control for
High-Speed and High-Quality Laser Cutting, Proc. of ICALEO'85, pp.129/136 (1985)
- [27] 毛利, 斉藤, 石田: 放電加工機実稼働における機械的諸特性に関する研究,
電気加工学会誌, 20-39, 19/29 (1987)
- [28] 安達, 吉田, 国枝: 単発放電における気泡の挙動と加工反力,
電気加工学会全国大会講演論文集, 25/28 (1996)
- [29] 後藤, 真柄, 種田, 今井: '96 最新・日本の型技術情報 76 例
新適応制御 Fuzzy Pro による形彫り放電加工の高速・高精度化,
型技術, Vol.11, No.8, pp.118/119 (1996)
- [30] 尾籐, 今井, ビチャイ, 中野: 外乱オブザーバによる放電加工精度補償,
第 16 回シミュレーション・テクノロジーコンファレンス, pp.29/32 (1997)
- [31] 今井, 三宅, 竹下, 尾籐, ビチャイ, 中野: 外乱オブザーバによる放電加工深さ精
度の改善, 第 36 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.845/846 (1997)
- [32] 今井, 竹下, 尾籐, ビチャイ, 中野: モードモデルにもとづく外乱オブザーバを用
いた放電加工精度の改善, (計測自動制御学会論文集に投稿中)
- [33] Y.Imai, H.Miyake, M.Takeshita, H.Bitoh, V.Saechout and M.Nakano : Improvement of
Machining Accuracy in Die-Sinking EDM using Disturbance Observer,
Proc. of the ISEM-12, (1998.5 will be published)
- [34] 美多, 酒美: 疑似オブザーバによる外乱推定器の設計,
計測自動制御学会論文誌, 13, 1/6 (1977)
- [35] 岩井, 井上, 川路: オブザーバ, コロナ社 (1988)
- [36] 山田: オブザーバによるサーボモータ系の固体摩擦の推定と
位置決め制御への応用, 計測自動制御学会論文集, 24-2, 162/169 (1988)

- [37] 粟屋,加藤,三宅,伊藤: 外乱オブザーバを利用した非線形摩擦のトルクバイアス補償法, 日本機械学会論文集, 57-534-C, 371/376 (1991)
- [38] 大西: 外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, 11-4, 486/493 (1993)
- [39] 大久保: 機械のモデル・アナリシス, 中央大学出版, (1982)
- [40] 古田, 佐野: 基礎システム理論, 135/137, コロナ社 (1978)
- [41] 増沢, 田中, 藤野; 可動コイル式ヘッドによる放電微細加工の高速化 電気加工学会誌, Vol. 8, No.16, 43/52, (1975)
- [42] 樋口, 古谷, 山形, 武田; 超小型放電加工機の重畳用圧電素子による性能の改善 精密工学会誌, Vol.58, No.3, 501/506, (1992)
- [43] 田上, 毛利, 斉藤, 大竹, 成宮; 放電加工主軸ユニットの開発研究 精密工学会春季大会学術講演会論文集, 567/568, (1988)
- [44] 千葉, 斉藤, 毛利, 大竹, 成宮; ロボットによる放電加工の研究 精密工学会春季大会学術講演会論文集, 579/580, (1988)
- [45] 今井, 佐竹, 森田: 高速電極駆動装置による放電加工状態の安定化, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, Vol.1990, pp.685/686 (1990)
- [46] 今井, 佐竹, 種田, 小林: 高速電極駆動装置による放電加工速度の改善, 電気加工学会誌, Vol.27, No.55, pp.23/30 (1993)
- [47] Y.Imai, A.Satake, A.Taneda and K.Kobayashi : Improvement of EDM Machining Speed by Using High Frequency Response Actuator, Int. J. of Electrical Machining, No.1, pp.21/26 (1996)
- [48] 石井, 八木: CO₂ レーザ加工技術, 日刊工業新聞社 (1992)
- [49] Dale R. Akitt, H.J.J. Seguin, Christopher V. Sellathamby, and H. Reshef : High performance automatic alignment and power stabilization system for a multikilowatt CO₂ laser, Rev. Sci. Instrum., 63-3, 1859/1866 (1992)

- [50] Dale R. Akitt, H.J.J. Seguin, Martin R. Cervenak, and Suwas K. Nikumb :
Electronic Mode and Power Control of a High-Power CO₂ laser,
IEEE J. Quantum Electronics, 26-8, 1413/1416 (1990)
- [51] 末田, 田中, 山本, 渡邊, 福井 : CO₂ レーザ加工機の開発,
三菱重工技報, 26-4, 356/360 (1989)
- [52] 軽部, 家久 : レーザー出力制御技術, レーザー研究, 12-3, 146/153 (1984)
- [53] 中野, 今井 : 位置決めサーボ系の学習的設計法,
計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.6, pp.619/623 (1985)
- [54] 高橋, 今井, 森田, 松原, 長野, 福島 : 適応型フィードフォワード制御を用いたレー
ザ発振器の出力制御,
精密工学会秋季大会学術講演会論文集, Vol.1994, pp.293/294 (1994)
- [55] 今井, 高橋, 森田 : 適応型フィードフォワード制御によるレーザ出力応答の改善,
(計測自動制御学会論文集 Vol.34, No.3 に掲載予定)
- [56] S. Hara, T. Sugie : Independent Parameterization of Two-Degree-of-Freedom
Compensators in General Robust Tracking Systems, IEEE Trans., AC33-1, 59/67 (1988)
- [57] M. Kuzumoto, M. Tanaka, and S. Yagi : Practical Model for Gas Temperature Effects
on CO₂ lasers, IEEE J. Quantum Electronics, 27-3, 471/475 (1991)
- [58] 鎌野, 鈴木, 井内, 富塚 : アダプティブフィードフォワード制御を用いた速度およ
び位置制御システム, システム制御情報学会論文誌, 4-8, 331/338 (1991)
- [59] Rafael Kelly : A Linear-State Feedback Plus Adaptive Feed-Forward Control for
DC Servomotors, IEEE Trans., IE34-2, 153/157 (1987)
- [60] M. Kawato, Y. Uno, M. Isobe and R. Suzuki : Hierarchical Neural Network Model
for Voluntary Movement with Application to Robotics,
IEEE Control Systems Magazine, 8, 8/16 (1988)
- [61] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama, and R. Suzuki : Feedback-Error-Learning
Neural Network for Trajectory Control of Robotic Manipulator,
Neural Networks, 1, 251/265 (1988)

発表論文リスト

本研究に関連する発表論文リスト

掲載論文

- 1) 今井, 佐竹, 種田, 小林: 高速電極駆動装置による放電加工速度の改善, 電気加工学会誌, Vol.27, No.55, pp.23/30 (1993)
- 1') Y.Imai, A.Satake, A.Taneda and K.Kobayashi : Improvement of EDM Machining Speed by Using High Frequency Response Actuator, Int. J. of Electrical Machining, No.1, pp.21/26 (1996)
- 2) 今井, 高橋, 森田: 適応型フィードフォワード制御によるレーザ出力応答の改善, (計測自動制御学会論文集 Vol.34, No.3 に掲載予定)
- 3) 今井, 竹下, 尾籐, ビチャイ, 中野: モードモデルにもとづく外乱オブザーバを用いた放電加工精度の改善, (計測自動制御学会論文集に投稿中)
- 3') Y.Imai, H.Miyake, M.Takeshita, H.Bitoh, V.Saechout and M.Nakano : Improvement of Machining Accuracy in Die-Sinking EDM using Disturbance Observer, Proc. of the ISEM-12, (1998.5 will be published)
- 4) 中野, 今井: 位置決めサーボ系の学習的設計法, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.6, pp.619/623 (1985)

国際学会発表論文

- 1) A.Morita, Y.Iami, A.Noda and M.Takegaki : Fuzzy Controller with Chained Structure, Proc. of the IFSA, pp.83/84 (1988)
- 2) A.Morita, Y.Imai, H.Maruyama and K.Kobayashi : Fuzzy Controller for EDM, Proc. of the ISEM-9, pp.236/239 (1989)

- 3) Y.Imai, T.Takahashi, A.Morita, M.Matsubara, O.Nagano and T.Fukushima : Adaptive Feedforward Control for Improving Power Step Response of CO₂ Laser, Proc. of the ISEM-11, (1995)

国内学会発表論文

- 1) 今井, 佐竹, 森田: 高速電極駆動装置による放電加工状態の安定化, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, Vol.1990, pp.685/686 (1990)
- 2) 高橋, 今井, 森田, 松原, 長野, 福島: 適応型フィードフォワード制御を用いたレーザ発振器の出力制御, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, Vol.1994, pp.293/294 (1994)
- 3) 後藤, 真柄, 種田, 今井: '96最新・日本の型技術情報76例 新適応制御 Fuzzy Pro による形彫り放電加工の高速・高精度化, 型技術, Vol.11, No.8, pp.118/119 (1996)
- 4) 尾籐, 今井, ビチャイ, 中野: 外乱オブザーバによる放電加工精度補償, 第16回シミュレーション・テクノロジーコンファレンス, pp.29/32 (1997)
- 5) 今井, 三宅, 竹下, 尾籐, ビチャイ, 中野: 外乱オブザーバによる放電加工深さ精度の改善, 第36回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.845/846 (1997)

本研究に関連しない発表論文リスト

掲載論文

- 1) 佐藤, 今井, 赤松, 後藤, 尾崎, 小林: 放電電圧波形に基づく加工状態検出, 電気加工学会誌, Vol.29, No.62, pp.27/39 (1995)
- 2) 佐藤, 今井, 後藤, 真柄, 竹内, 渡辺: 定常電極消耗モデルに基づいた新しい溝加工方法, 電気加工学会誌, Vol.31, No.67, pp.1/13 (1997)
- 3) 後藤, 真柄, 今井, 三宅, 斉藤, 毛利: 放電加工による硬質被膜の形成, 電気加工学会誌, Vol.31, No.68, pp.26/31 (1997)

国際学会発表論文

- 1) D.Clifton, Y.Imai and J.A.McGeough: Some Ultrasonic Effects in Machining Materials Encountered in the Offshore Industries, Proc. of the 30th International MATADOR Conference, pp.119/123 (1993)
- 2) A.Goto, M.Wada, T.Magara, Y.Imai and K.Kobayashi: Study on High-Quality Finishing by EDM Nonflammable Dielectric Fluid, Proc. of the ISEM-11, (1995)
- 3) H.Miyake, Y.Imai, A.Goto, T.Magara, N.Saito, N.Mohri and A.Takeuchi: Improvement of Tool Lifethrough Surface Modification by Electrical Discharge Machining, Proc. of the ISEM-12, (1998.5 will be published)

国内学会発表論文

- 1) 中野, 今井: Bang-bang 素子を用いた位置決めサーボ系の学習的設計法, 自動制御連合講演会前刷, Vol.26th, pp.203/204 (1983)
- 2) 今井, 森田, 丸山: 放電加工における最小分散制御の検討, 第 26 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.441/442 (1987)

- 3) 真柄, 高鷺, 弥富, 今井: 放電加工における統計処理手法の研究 (第1報),
—無負荷時間Td分布変化率による電極定時引上げ動作の自動制御—,
電気加工技術, Vol.11, No.32, pp.13/18 (1987)
- 4) 今井, 森田, 野田, 丸山: 連鎖構造を持つファジィ制御器による加工状態の認識,
システムシンポジウム講演論文集, Vol.14th, pp.75/78 (1988)
- 5) 森田, 今井, 竹垣: 神経回路型ファジィ知識モデルによる加工ノウハウの学習,
第27回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.347/348 (1988)
- 6) 森田, 今井, 野田, 丸山, 小林: 形彫り放電加工機のファジィ制御,
電気加工技術, Vol.13, No.41, pp.25/31 (1989)
- 7) 野田, 中村, 森田, 今井: 放電加工機の知的制御システム,
インテリジェントFAシンポジウム講演論文集, Vol.2nd, pp.39/40 (1989)
- 8) 今井, 竹垣: 放電加工状態のニューラルネットワークによる認識とメンタルモデ
リングの可能性,
システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, Vol.33rd, pp.73/74 (1989)
- 9) 佐藤, 今井, 赤松, 後藤, 尾崎, 小林, 弥富, 森田: 放電パルス波形による放電状態
の判別, 電気加工学会全国大会講演論文集, pp.3/6 (1992)
- 10) 後藤, 赤松, 尾崎, 佐藤, 今井, 小林, 弥富, 森田: 形彫放電加工機のファジィ適応
制御 (第2報), 電気加工学会全国大会講演論文集, pp.61/64 (1992)
- 11) 佐藤, 今井, 赤松, 後藤, 尾崎, 小林: 放電電圧波形に基づく放電状態検出とその加
工制御への応用, 電気加工技術, Vol.17, No.56, pp.1/10 (1993)
- 12) 佐藤清, 佐藤達, 今井, 山田, 真柄, 小林: ワイヤ放電加工における放電位置集中と
ワイヤ断線, 電気加工学会全国大会講演論文集, Vol.1994, pp.95/98 (1994)
- 13) 三宅, 今井: レーザビームによる薄リブ電極加工,
電気加工学会全国大会講演論文集, Vol.1994, pp.107/110 (1994)
- 14) 千代, 野田, 今井, 佐藤, 小林: 形彫り放電加工における多段加工条件の自動生成
電気加工技術, Vol.18, No.60, pp.15/22 (1994)

- 15) 千代, 今井, 小林: 形彫り放電加工における電極消耗シミュレーション, 電気加工技術, Vol.19, No.62, pp.7/12 (1995)
- 16) 湯沢, 真柄, 後藤, 今井, 佐藤, 千代: 小径電極による微細輪郭放電加工, 電気加工技術, Vol.19, No.63, pp.1/6 (1995)
- 17) 山田, 佐藤達, 佐藤清, 真柄, 今井: ワイヤ放電加工機における適応制御技術 (PM制御), 型技術者会議講演論文, Vol.1995, pp.220/221 (1995)
- 18) 山田, 佐藤達, 佐藤清, 真柄, 今井: ワイヤ放電加工機における適応制御技術 (PM制御), 型技術, Vol.10, No.7, pp.140/141 (1995)
- 19) 湯沢, 真柄, 千代, 小林, 後藤, 今井, 佐藤: 小径電極を用いた微細輪郭放電加工, 型技術, Vol.10, No.12, pp.84/85 (1995)
- 20) 佐藤, 今井, 赤松, 後藤, 尾崎, 小林: 放電電圧波形に基づく加工状態検出, 電気加工学会誌, Vol.29, No.62, pp.27/39 (1995)
- 21) 千代, 今井, 小林: 形彫り放電加工における電極消耗シミュレーション, 精密工学会春季大会学術講演会論文集, Vol.1995, pp.981/982 (1995)
- 22) 湯沢, 真柄, 後藤, 今井, 佐藤, 千代, 小林: 小径電極による微細輪郭放電加工 (第1報) - 基本特性評価 -, 精密工学会春季大会学術講演会論文集, Vol.1995, pp.965/966 (1995)
- 23) 佐藤達, 佐藤清, 山田, 真柄, 今井, 小林: ワイヤ放電加工における加工エネルギーとワイヤ断線, 精密工学会春季大会学術講演会論文集, Vol.1995, pp.983/984 (1995)
- 24) 佐藤, 千代, 今井, 小林: 電極消耗のモデル化の試み (第1報) - 2次元電極による走査加工の場合 -, 電気加工学会全国大会講演論文集, Vol.1995, pp.159/160 (1995)
- 25) 千代, 佐藤, 今井, 小林: 形彫り放電加工における電極消耗シミュレーション (第2報) - 回転電極への拡張 -, 電気加工学会全国大会講演論文集, Vol.1995, pp.161/162 (1995)
- 26) 竹内, 渡辺, 佐藤, 今井, 真柄, 後藤: 形状創成放電加工技術の開発とその応用, 型技術, Vol.11, No.13, pp.90/91 (1996)

- 27) 佐藤, 今井, 真柄, 後藤, 竹内, 渡辺: 電極消耗のモデル化の試み, 電気加工技術, Vol.20, No.66, pp.1/10 (1996)
- 28) 三谷, 松原, 千代, 今井, 佐藤, 湯沢, 真柄: 微細輪郭放電加工 CAM システム 精密工学会春季大会学術講演会論文集, Vol.1996, pp.239/240 (1996)
- 29) 佐藤清, 佐藤達, 山田, 真柄, 今井: ワイヤ放電加工におけるワイヤ断線限界と加工エネルギーに関する考察, 電気加工技術, Vol.21, No.69, pp.22/26 (1997)
- 30) 湯沢, 真柄, 今井, 佐藤: '97 最新・日本の型技術情報 78 例 小径電極を用いた微細創成放電加工 (第2報), 型技術, Vol.12, No.8, pp.104/105 (1997)
- 31) 佐藤, 今井, 後藤, 真柄, 竹内, 渡辺: 定常電極消耗モデルに基づいた新しい溝加工方法, 電気加工学会誌, Vol.31, No.67, pp.1/13 (1997)
- 32) 三宅, 今井, 後藤, 真柄, 斉藤, 毛利: 液中放電表面処理による切削工具の寿命延, 電気加工学会全国大会講演論文集, Vol.1997, pp.5/6 (1997)
- 33) 佐藤清, 佐藤達, 山田, 真柄, 今井: ワイヤ放電加工におけるワイヤ断線防止制御 電気加工学会全国大会講演論文集, Vol.1997, pp.45/46 (1997)
- 34) 湯沢, 真柄, 今井, 佐藤: 小径電極を用いた微細創成放電加工, 電気加工学会全国大会講演論文集, Vol.1997, pp.65/66 (1997)
- 35) 湯沢, 真柄, 後藤, 今井, 佐藤,: 小径電極を用いた微細創成放電加工 (第2報) —微細ロッド電極の適用— 精密工学会春季大会学術講演会論文集, Vol.1997, pp.269/270 (1997)
- 36) 後藤, 真柄, 今井, 三宅, 斉藤, 毛利: 創成放電加工による微細領域の放電表面処理 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, Vol.1997, pp.334 (1997)

その他発表論文

- 1) 赤松, 後藤, 種田, 河津, 金原, 今井: 限界加工への挑戦 ハイテクメカトロ機器の最新動向 最近の汎用形彫放電加工機,
三菱電機技報, Vol.71, No.4, pp.359/364 (1997)
- 2) 水野, 福島, 金岡, 西前, 今井, 竹野: 限界加工への挑戦 ハイテクメカトロ機器の最新動向 新用途を開拓する短パルスCO₂レーザ加工機,
三菱電機技報, Vol.71, No.4, pp.395/400 (1997)

謝 辞

本論文は、筆者が三菱電機（株）産業システム研究所および東京工業大学制御工学専攻社会人博士課程において行ってきた研究をまとめたものです。

研究を進め、本論文をまとめるにあたっては、東京工業大学制御システム工学科中野道雄教授より終始懇切なご指導と温かい励ましの言葉を賜りました。厚くお礼申し上げます。また、本論文に関し、貴重なお時間をお割きいただき、ご教示、ご助言を賜りました同大学同学科 美多勉教授、戸倉和教授、松尾芳樹助教授、山北昌毅助教授に心よりお礼申し上げます。

筆者の社会人博士課程への派遣に際し、多大なるご支援と激励とをいただきました、三菱電機（株）産業システム研究所所長 中堀一郎博士、同研究所FAシステム開発部部长 吉田利夫氏、名古屋製作所開発部部长 大島道隆氏に深く感謝申し上げます。

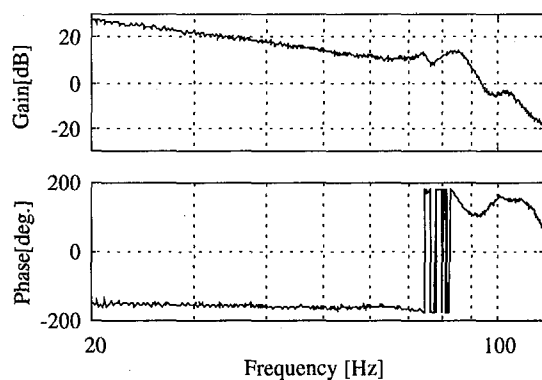
また本研究および実験を進めるにあたり、三菱電機（株）名古屋製作所NCシステム開発部NCシステム第一課課長 森田温氏、同製作所レーザシステム開発部 松原真人氏、三菱電機（株）技術研修所 竹下光夫氏、三菱電機（株）産業システム研究所FAシステム開発部 高橋悌史氏、同研究所パワーエレクトロニクス開発部 佐竹彰氏、東京工業大学中野研究室助手 ビチャイサエチャウ氏、三菱重工業（株）名古屋機器製作所 尾藤浩司氏にご尽力いただきました。感謝の意を表します。

さらに、三菱電機（株）産業システム研究所FAシステム開発部第2グループの方々および東京工業大学中野研究室の方々には本論文の完成に関し様々なご意見をいただきました。深く感謝いたします。

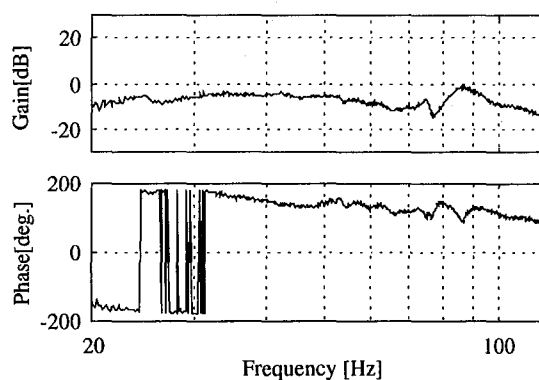
その他、本研究にご協力いただいたすべての方々に心より感謝し、お礼申し上げます。

付録 A

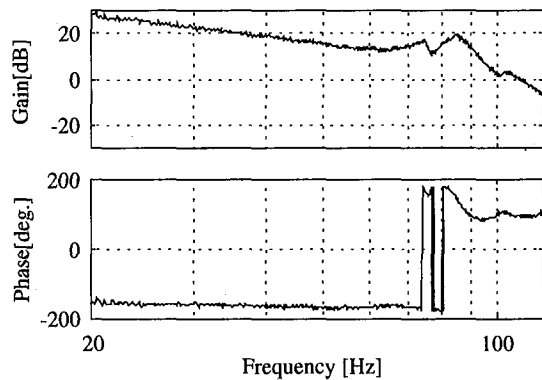
Z 軸の電極駆動モータの実効電流値から測定点での変位までの周波数特性を示す.



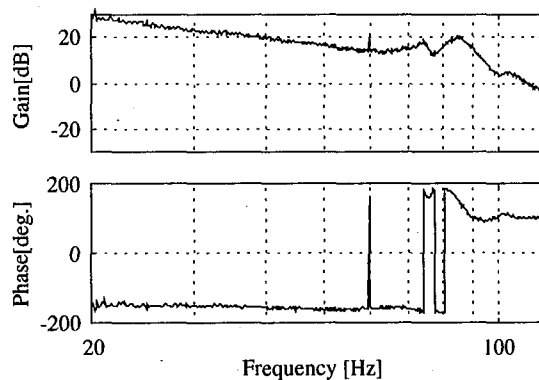
(1) location 2



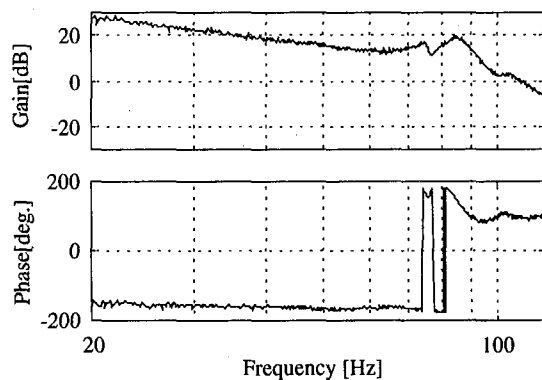
(2) location 3



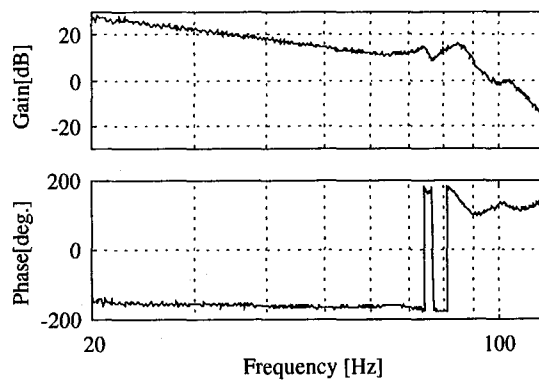
(3) location 7



(4) location 8

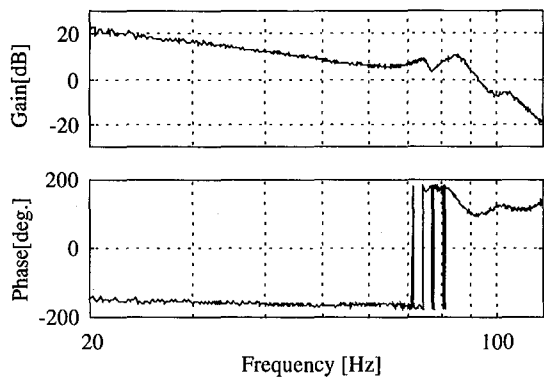


(5) location 9

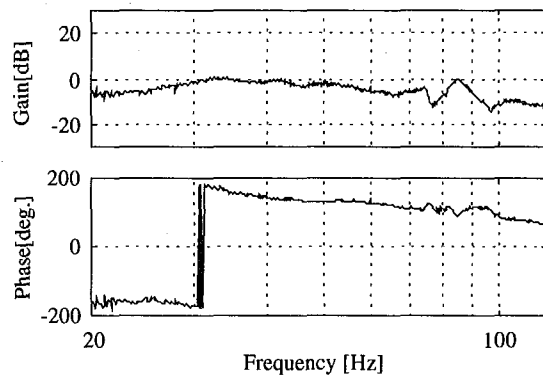


(6) location 10

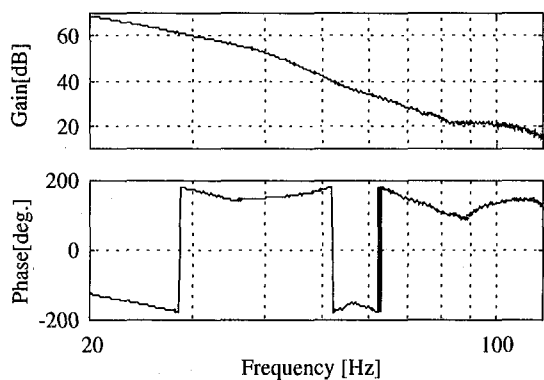
(to be continued)



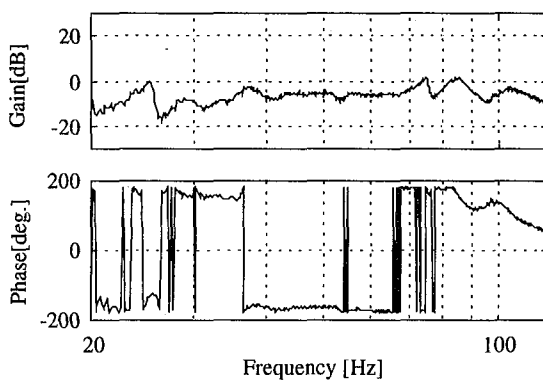
(7) location 11



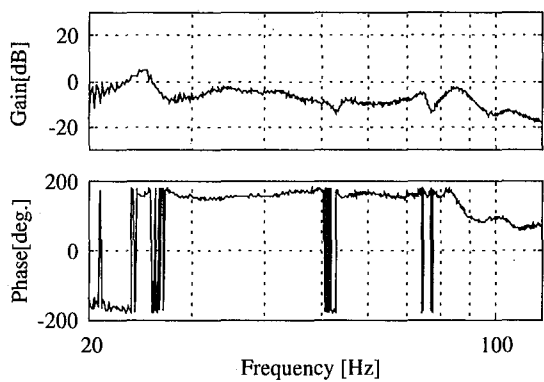
(8) location 12



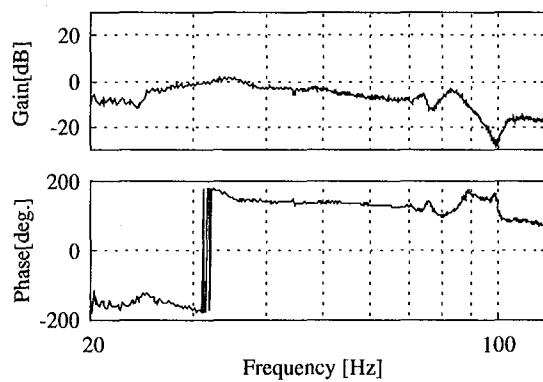
(9) location 13



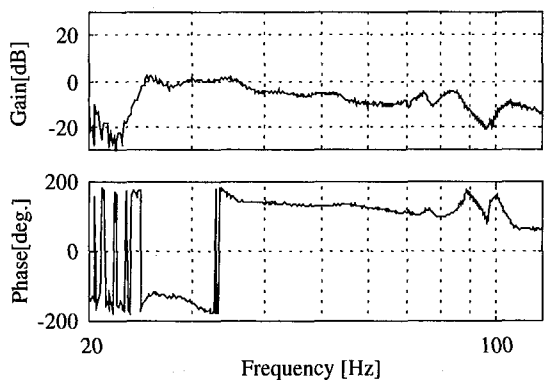
(10) location 16



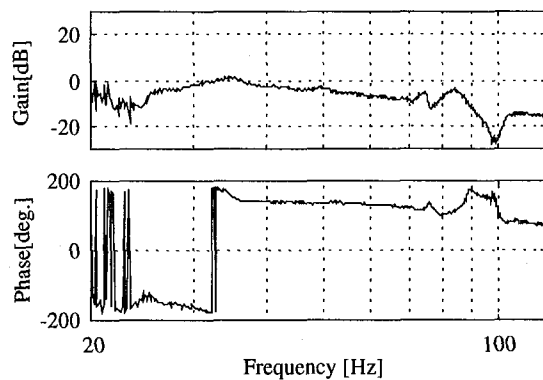
(11) location 17



(12) location 19

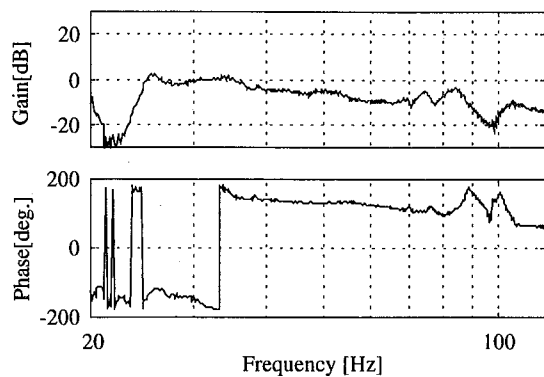


(13) location 20

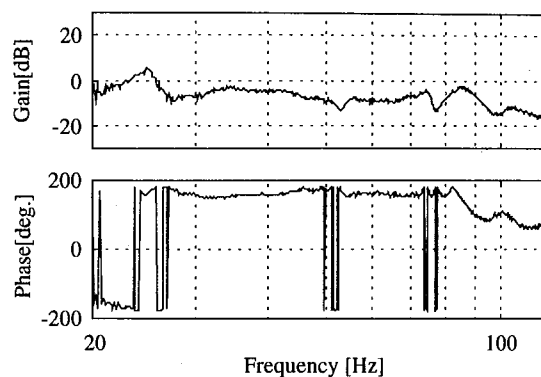


(14) location 21

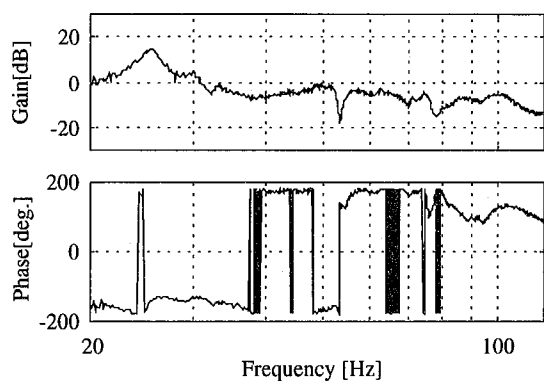
(to be continued)



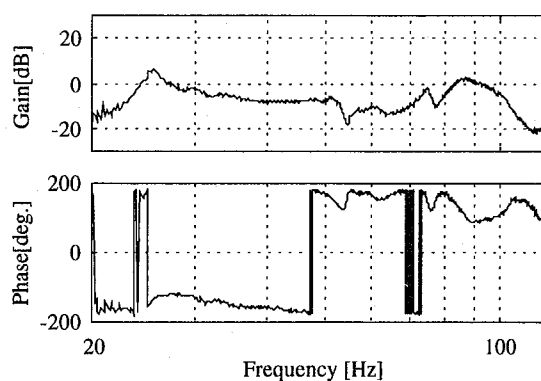
(15) location 22



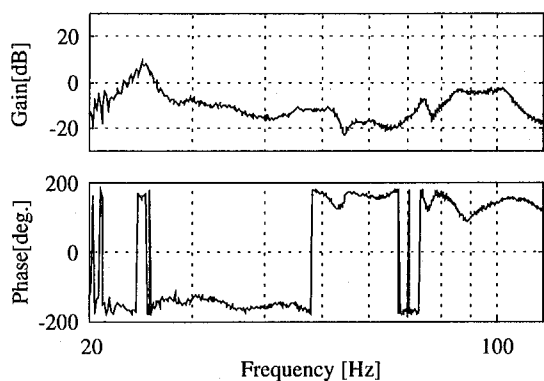
(16) location 23



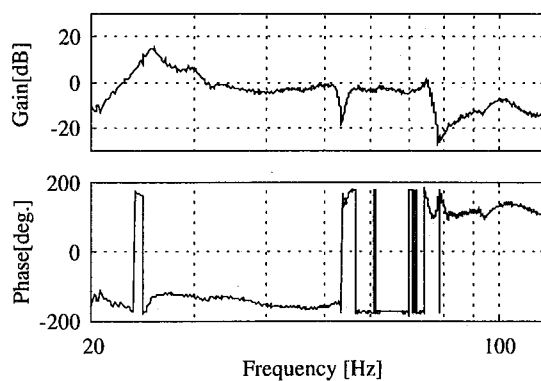
(17) location 24



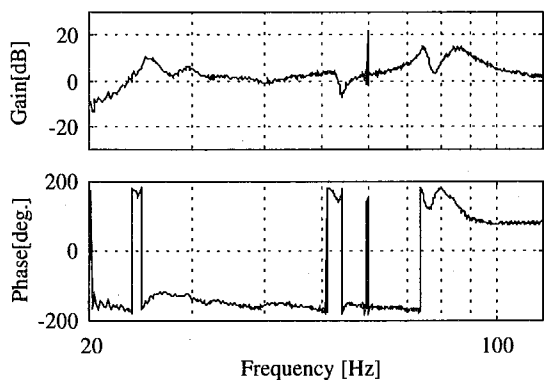
(18) location 26



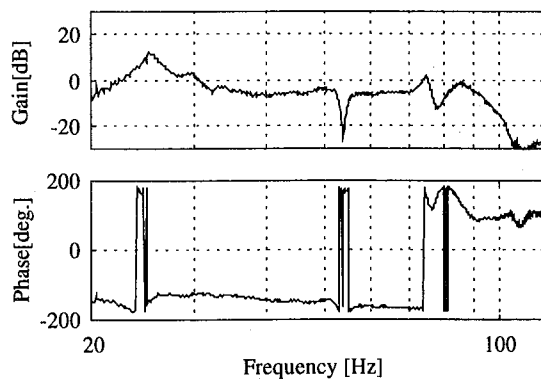
(19) location 27



(20) location 29

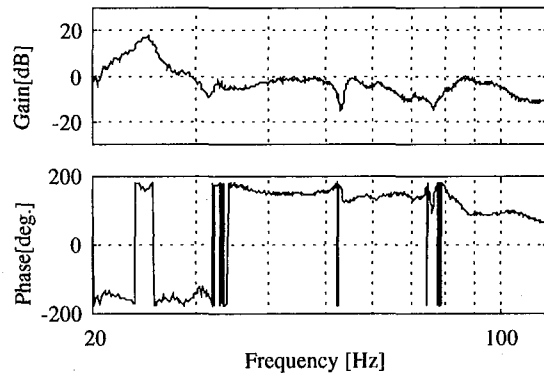


(21) location 31

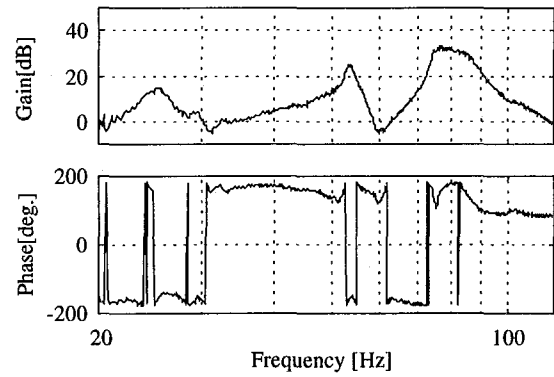


(22) location 32

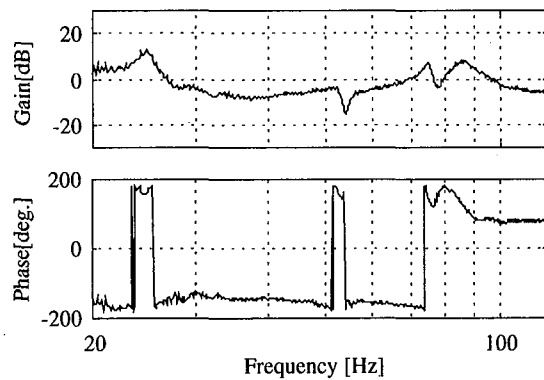
(to be continued)



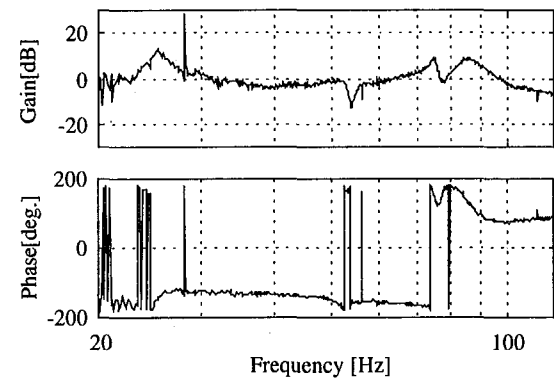
(23) location 33



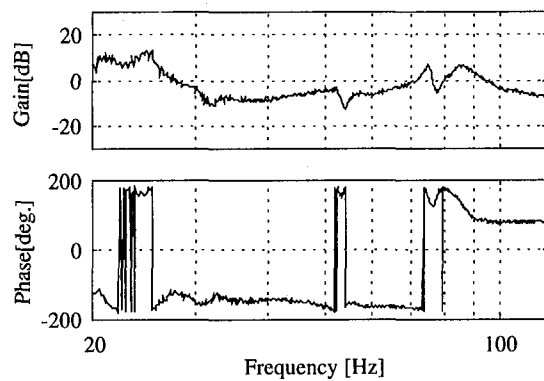
(24) location 34



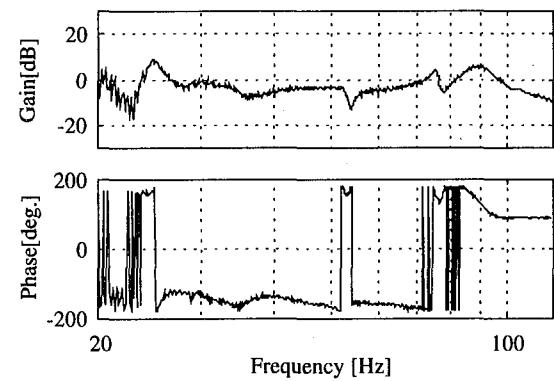
(25) location 35



(26) location 36



(27) location 37

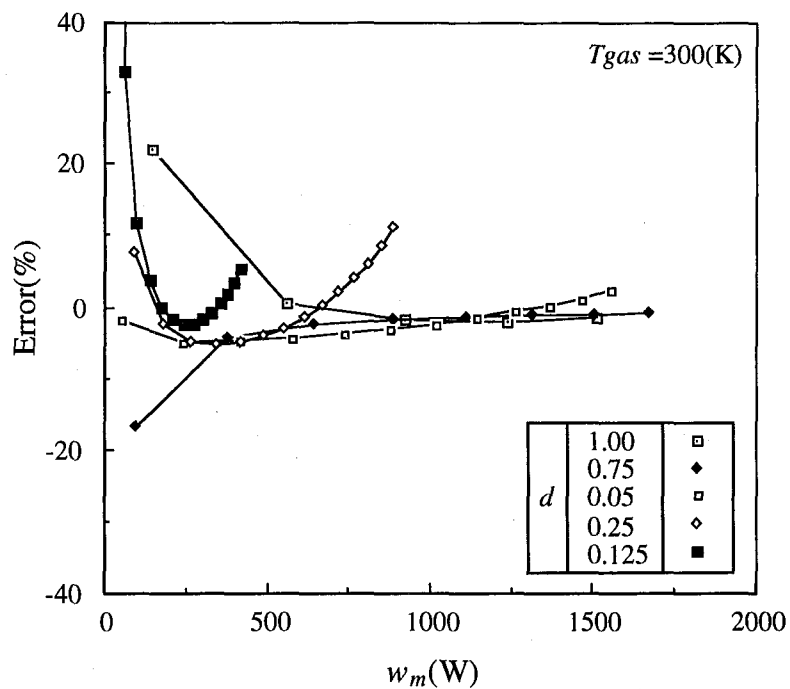


(28) location 39

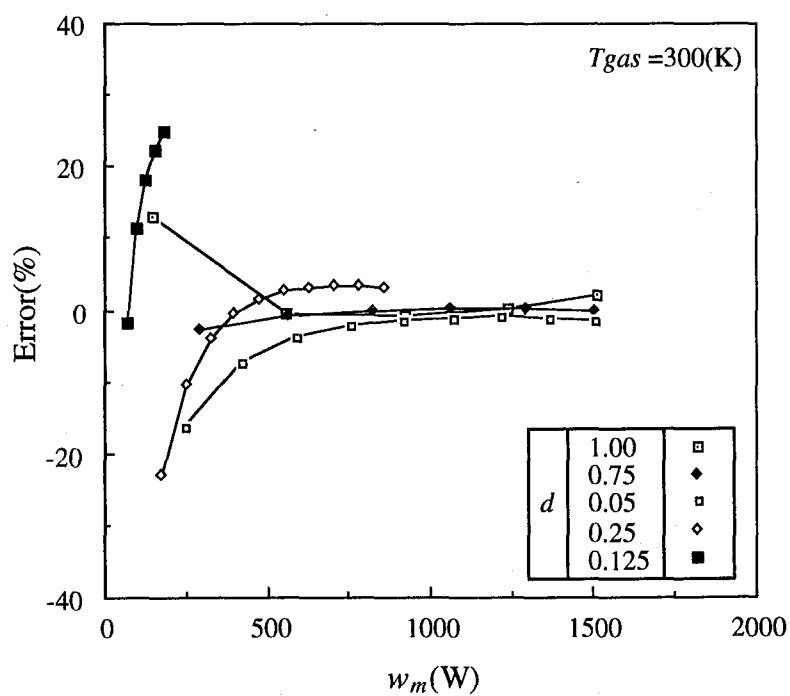
Fig. A.1 Frequency responses from motor current to displacement at each location.

付録 B

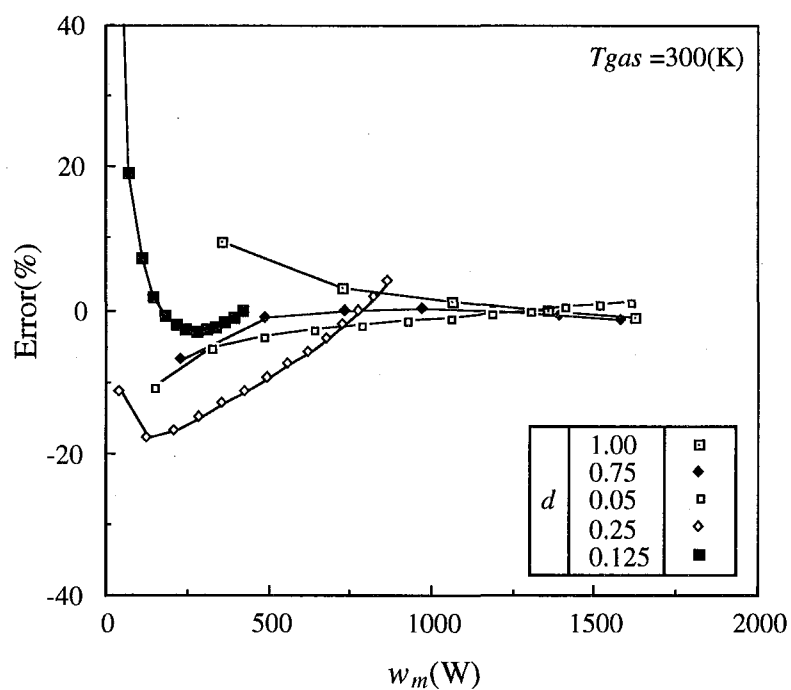
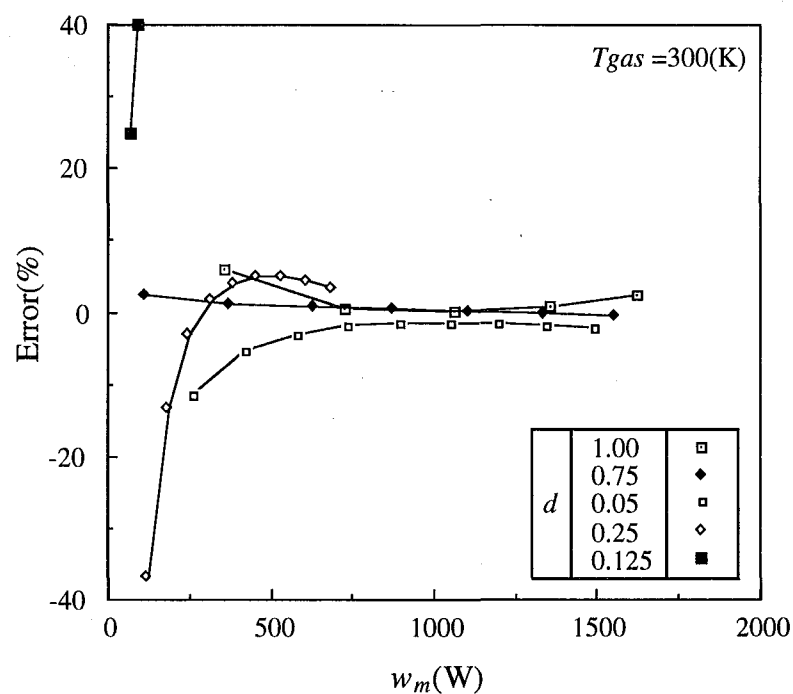
逆システムのモデル化誤差の一例を **Fig. B.1** に示す.



(a) $f=200(Hz)$, state1



(b) $f=2000(Hz)$, state1

(c) $f=200(Hz)$, state2(d) $f=2000(Hz)$, state2**Fig. B.1** Errors in calculated peak currents using model.

付 録 C

適応修正則の安定性について考察を加える。

レーザ出力のステップ入力を w_r ，加工パルスのデューティファクタを d ，加工パルスの繰返し周波数を f とすると，フィードフォワード制御器の出力信号 i_{FF} は，(4.2) 式から以下のように静的なシステムで記述できる。ただし， K_F は非線形ゲイン， W_F はオフセットである。

$$i_{FF} = \frac{1}{K_F} w_r - \frac{W_F}{K_F} \quad (C1)$$

一方，レーザ発振器の逆システムが静的なシステムとみなせる場合，レーザ出力のステップ入力 w_r ，あるいは k 回目の適応修正に伴うフィードフォワード制御器の出力信号のステップ状変化 i_{FF} に対するフィードバック制御器の出力信号 i_{FB} は，(4.2)，(4.11)，(4.12)，(4.13) 式より

$$i_{FB} = \frac{k_p s + k_i}{T_s s^2 + (1 + K_m k_p) s + K_m k_i} (w_r - W_{osm} - K_m i_{FF}) \quad (C2)$$

となる。したがって，フィードバック制御器の出力信号 i_{FB} の定常値を $i_{FB}(k)$ とすると，最終値定理より

$$i_{FB}(k) = \frac{1}{K_m} (w_r - W_{osm}) - i_{FF} \quad (C3)$$

となり， $i_{FB}(k) \rightarrow 0$ ならば

$$i_{FF} = \frac{1}{K_m} (w_r - W_{osm}) \quad (C4)$$

となる。

(C3) 式は (4.9) 式および Table 4.3 から以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} i_{FB}(k) &= \frac{1}{K_m} (w_r - W_{osm}) - \frac{w_{em} - \varphi(d, f, i_{po}(k))}{d} \\ &= \frac{1}{K_m} (w_r - W_{osm}) - \frac{w_{em} + \varphi_c + \alpha i_{po}(k)}{d} \end{aligned} \quad (C5)$$

ただし， $i_{po}(k)$ は k 回目の適応修正時のしきい値電流である。また， $\varphi(d, f, i_{po}(k))$ は Table 4.3 から直線補間近似するため， φ_c ， α は (C6) 式のように求められ， w_{em} ， φ_c ， α は

適応修正時において一定とする.

$$\varphi_c = -\frac{\varphi_2 i_{po2} - \varphi_1 i_{po1}}{i_{po2} - i_{po1}}, \quad \alpha = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{i_{po2} - i_{po1}} \quad (C6)$$

$$\varphi_1 = \varphi(d, f, i_{po1}), \quad \varphi_2 = \varphi(d, f, i_{po2}), \quad i_{po1} = 1.832, \quad i_{po2} = 2.280$$

ここで, (C5) 式および (4.10a) 式の適応修正則より, k 回目と $k+1$ 回目の適応修正時におけるフィードバック制御器の出力信号の定常値の関係を求めると

$$i_{FB}(k+1) = (1 - \alpha \gamma i_{FF}(k)) i_{FB}(k) \quad (C7)$$

となる. したがって, $i_{FB}(k) \rightarrow 0$ となるためには, (C7) 式において次式が成り立つことである.

$$|1 - \alpha \gamma i_{FF}(k)| < 1 \quad (C8)$$

いま, レーザ発振器の特性変動幅はあらかじめ知ることが可能なため, $0 < \alpha < \alpha_{max}$, $0 < i_{FF}(k) < i_{FFmax}$ なる α_{max} , i_{FFmax} を見つけることができ, (C8) 式を満足する γ を容易に決定できる. このとき, $i_{FB}(k) \rightarrow 0$ となり (C4) 式が成り立つ. なお, (C8) 式は前述の式 (4.10b) と等価である. したがって, ガス劣化やガス温度変化によるレーザ発振器の非常にゆっくりとした特性変動に対しては, 前述の適応修正則により安定に逆システムを修正することが可能である.

付録 D

従来の制御系により加工した穴と提案した制御系により加工した穴の真円度測定した代表的な結果を **Fig. D.1** に示す.

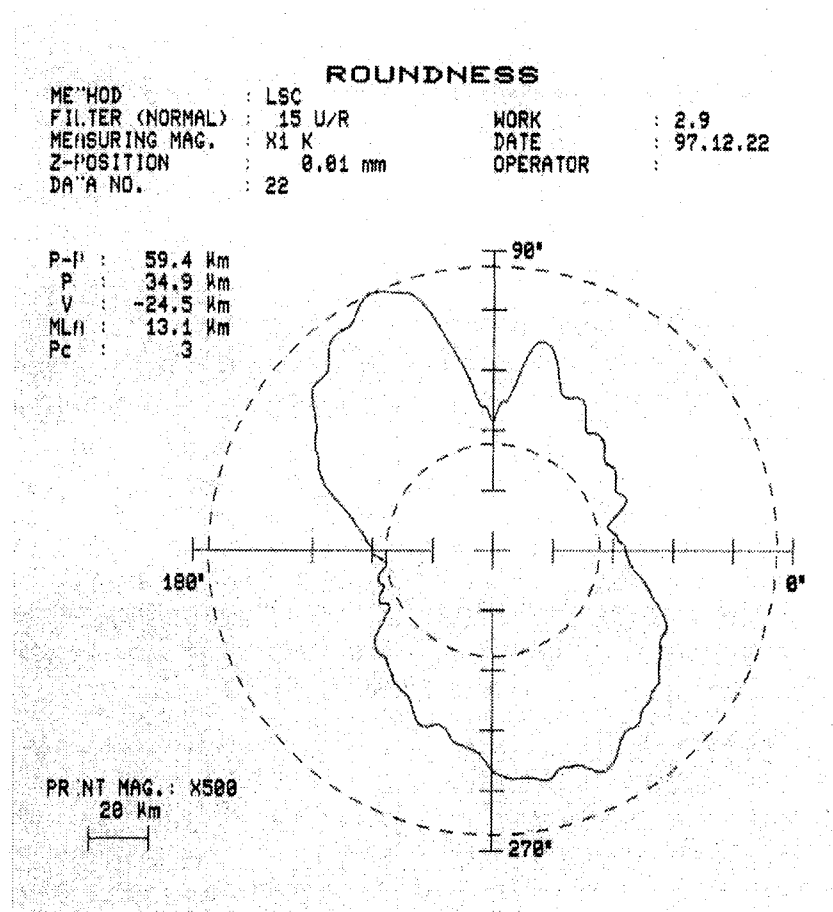


Fig. D.1(a) Roundness of a hole machined with conventional controller.

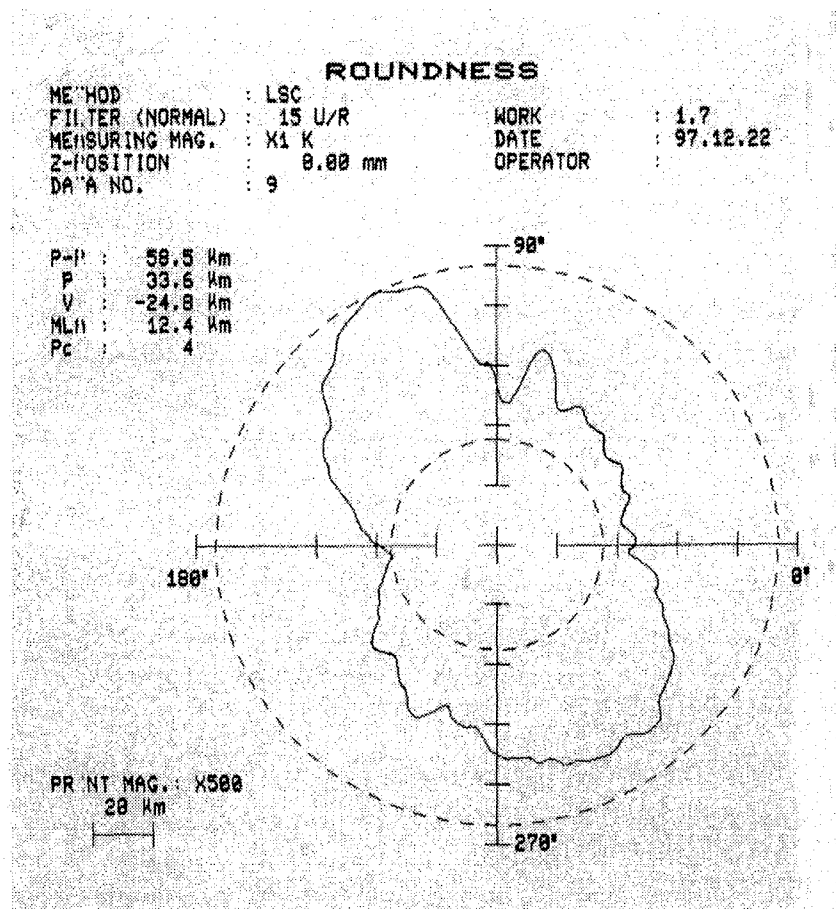


Fig. D.1(b) Roundness of a hole machined with proposed controller.